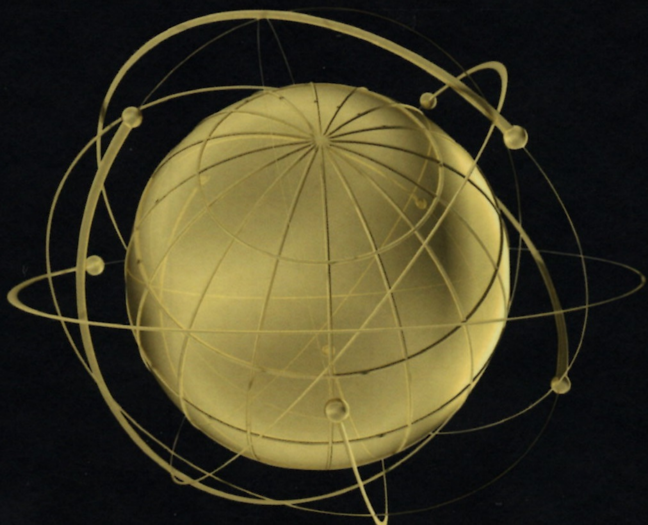
EL MOVIMIENTO PLANETARIO

KEPLER

Bailando con las estrellas



NATIONAL GEOGRAPHIC

JOHANNES KEPLER fue un hombre profundamente religioso que escogió las herramientas del pujante método científico para armar una visión del Cosmos que reflejara la armonía divina. Con sus tres leyes del movimiento planetario dio elegante expresión matemática a las observaciones de Tycho Brahe, reafirmó el heliocentrismo copernicano y allanó el camino a la síntesis newtoniana. Como tantos otros pioneros de la frontera científica, coqueteó con disciplinas ahora consideradas supersticiones; en su caso, la astrología, de la cual llegó a convertirse en un experto reclamado por reyes y príncipes. Ni el favor de los poderosos ni su devoción le sustrajeron, no obstante, de las terribles consecuencias de las guerras religiosas que asolaban Europa.

EL MOVIMIENTO PLANETARIO

KEPLER

Bailando con las estrellas

NATIONAL GEOGRAPHIC

EDUARDO BATTANER LÓPEZ es catedrático de Astronomía y Astrofísica de la Universidad de Granada. Como investigador, su especialidad es el magnetismo cósmico en los medios interestelar e intergaláctico y en el Fondo Cósmico de Microondas. En el campo de la divulgación es autor de varios libros.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Age Fotostock: 61ai, 61ad, 61b, 85, 105ai, 105ad, 105b, 115b; Album: 31ai, 31ad, 31b, 51ad, 77a, 77b, 151, 153a; Archivo RBA: 25, 94; Jakob Bartsch: 153b; Corbis: 51b; Eduard Ender: 55; Ettore Ferrari/Jastrow: 53; Joseph Heintz el Viejo/ Museo de Historia del Arte de Viena: 23; Sir Godfrey Kneller: 89; Meister des Marienlebens: 27; *Mysterium Cosmographicum*: 33; NASA: 40; NASA/ESA/J. Hester & A. Loll (Universidad Estatal de Arizona): 106; NASA/ESA/JHU/R. Sankrit & W. Blair: 104; Pachango: 97; Photoaisa: 51ai, 74, 115ad; Piotr Rotkiewicz: 38; Anthony van Dyck/Pieter de Jode el Joven: 115ai.

ISBN: 978-84-473-7633-9
Depósito legal: B-4508-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

Johannes Kepler es una figura desconcertante. Podemos entender lo que hizo, pero es difícil entender cómo pudo hacerlo. Su obra nos produce asombro, admiración, veneración incluso y, a la vez, bochorno y escándalo. Erigió los pilares de la física moderna, pero, paradójicamente, lo hizo partiendo de los cimientos de una mentalidad medieval. Junto a grandes demostraciones, aparecen pensamientos de incomprensible ingenuidad. En muchos de sus libros se encuentran conviviendo apuntes de su vida personal, arrebatos místicos, florituras estilísticas y oraciones religiosas con teoremas precisos, tablas concienzudas, leyes correctas, errores reconocidos y argumentos objetivos. A veces incluso, en la misma página se da esta mezcolanza de tan dispares elementos que, a pesar de todo, forma un todo coherente en la mente de Kepler.

Hoy es fácil, al estudiar sus logros y sus errores, juzgar pensando: «Esto lo hizo bien; esto lo hizo mal; aquí acertó; aquí se equivocó; ¿cómo pudo decir esto?». En lo que hizo hay verdades sublimes y auténticos disparates. Sin embargo, es necesario meterse en su piel, tener muy presente esa época y esas circunstancias, cuando la ciencia moderna estaba naciendo, y hay que agradecerle su propia labor de comadrona.

Su mérito es colosal. En el mundo de la astronomía, si Copérnico no hubiera puesto el Sol en su sitio, algún otro lo hubiera hecho. Si Galileo no hubiera puesto el telescopio en posición vertical, algún

otro lo hubiera hecho. Sin desmerecer en absoluto la investigación de estos dos gigantes de la ciencia del universo, es difícil imaginar que algún otro pudiera haber hecho lo que Kepler hizo.

La Europa que vio nacer a Johannes Kepler era tan convulsa como cualquier otra época de la humanidad. Sin embargo, en esta ocasión, una serie de hechos excepcionales auspiciaban un profundo y próspero cambio cualitativo. Especialmente en el campo de la ciencia, el hombre estaba avanzando con pasos de gigante. El Renacimiento científico se retrasó con respecto al Renacimiento artístico pero, finalmente, eclosionó triunfante, inducido por unos pocos hombres en cuya lista no puede faltar el nombre de Kepler. El caso es que la ciencia, y en particular la física, y en particular la astronomía, estaban saliendo al fin de su placenta medieval.

Recordemos tres fechas previas que llevaron a tal cambio de estado, en su significado más físico de la palabra. La invención de la imprenta por Johannes Gutenberg, y su rápida diseminación por toda Europa, popularizó el libro, poniendo en la mano de los estudiosos todo el saber de los pensadores anteriores. Gracias a la imprenta, la cultura pasó de los monasterios a las universidades. El descubrimiento de América por Cristóbal Colón, gran marino y gran científico, y la vuelta al mundo de Fernando de Magallanes y Juan Sebastián Elcano abrieron los ojos aún legañosos de una Europa que contemplaba como nunca la magnitud y la forma de la Tierra. También los de Kepler, aunque nunca en su vida viera el mar y no se alejara más de cincuenta leguas de su pueblo natal.

Era una Europa que venía de estar considerablemente unida. Había estado unida por una cristiandad y por un imperio, pero estaba condenada a descomponerse. Sin embargo, permitió un tráfico de ideas y gente que acabaría motivando aquel colosal salto científico. Y también era una Europa unida por el lenguaje, puesto que el latín era hablado y escrito por todos los hombres cultos.

Pero esta situación distaba de ser tan ideal. El enemigo interno de Europa era la confrontación religiosa: los protestantes, luteranos, hugonotes o calvinistas y los católicos de la Contrarreforma agitaron la paz endeble de la Europa recién renacida. Esto es importante destacarlo aquí porque produjo grandes estragos en la vida de Johannes Kepler que pudieron haber dado al traste con

su propósito científico. Como veremos, debido a sus creencias luteranas fue expulsado de Graz, de Praga y de Linz, es decir, prácticamente de todos los lugares donde trabajó.

Los acontecimientos científicos durante la infancia de Kepler estaban ya fraguando la explosión de descubrimientos que vendría después. En Dinamarca, un astrónomo muy escrupuloso con las mediciones, Tycho Brahe, dispuso de toda una isla (Hven) para hacer sus cálculos en un observatorio (Uraniborg) sin restricción económica alguna. Pero quizá lo más resaltable fue que el astrónomo polaco Nicolás Copérnico había publicado en 1543 *De revolutionibus orbium coelestium*, libro donde se osaba decir que si la Tierra giraba en torno al Sol, y no al revés, los cálculos matemáticos de las posiciones de los planetas eran mucho más sencillos.

La humanidad no estaba aún preparada para tal descubrimiento. Lutero lo rechazó, y más violenta aún fue la reacción de su colaborador y sucesor, Melanchton, mientras que los católicos fueron inicialmente más tolerantes solo porque el libro había sido dedicado al papa Pablo III. Las reacciones ante la hipótesis heliocéntrica fueron muy dispares y vacilantes. En la Universidad de Salamanca era optativo recibir la enseñanza de la astronomía, bien por el sistema de Copérnico, bien por el de Ptolomeo. Pero pronto arreció la intolerancia católica en gran parte de Europa.

Kepler era un hombre muy religioso, esencialmente religioso. Eso no es sorprendente. Lo que sí lo es más, es que su fe y su ciencia estuvieran de tal modo intrincadas que aquella fue para esta su inspiración, su fuente de creatividad y su potencia. Pensaba que Dios había creado el mundo geométricamente perfecto. Y como Dios había creado al hombre a su imagen y semejanza, el hombre podía comprender el mundo. No todos los hombres, pero sí él. Por tanto, tenía la misión de dar a conocer a los hombres la belleza geométrica de la obra de Dios. No podía consentirse fallar en dicha misión, así que lo que encontrara tenía que estar tan comprobado que su certeza fuera incuestionable. Así no se hace la ciencia, pensamos hoy, pero así la hizo Kepler, siendo en ello tan desconcertante como en todo lo que llevó a cabo a lo largo de su vida.

Su fe también fue la causa de su accidentada trayectoria profesional y sus frecuentes cambios de ciudad en busca de un sitio

donde poder ejercer mejor el oficio de pensar. No sabía «si ir a una ciudad devastada o a una por devastar». No hay que olvidar que entonces la confrontación religiosa entre católicos y protestantes experimentaba su más encarnizada realidad. Ni que esta confrontación era especialmente cruenta precisamente en el sur de Alemania, donde él nació, y en Austria y en Bohemia, donde pasó la mayor parte de su vida. Protestante y educado en la confesión de Augsburgo, pero de creencia libre, fue también rechazado por sus propios correligionarios. Lutero había defendido la interpretación libre de la Biblia, pero sus sucesores no lo entendieron así.

Al contrario, los católicos, y en especial los jesuitas, quisieron atraer al catolicismo a tan respetable científico, pero él prefirió reiteradamente ser expulsado a la negación de su fe. Así, abandonó Graz por Praga, Praga por Linz, Linz por Zagan. Iba en busca de paz, pero el enfrentamiento religioso emigraba tras él. Podría haberse quedado en estas ciudades si hubiera renunciado a sus creencias. Y podría también haber vuelto a su patria, a la Universidad de Tubinga, pero su integridad fue extrema.

Así pues, como todos los grandes científicos de esa época, sufrió la intolerancia religiosa. Pero el caso de Kepler es distinto: padeció la intolerancia por su creencia, no por su ciencia. El modelo del mundo de Copérnico era rechazado tanto por Lutero como por el papa y, sin embargo, Kepler lo aceptó desde muy joven y lo defendió toda su vida sin que apenas fuera molestado por ello. Sí que es cierto que sus libros figuraron en el *Índice de libros prohibidos*, pero, como bien le dijo un amigo a modo de consuelo, no debía preocuparse por ello: esos eran los que más se leían.

Copérnico tuvo que declarar que el movimiento de la Tierra no era real, sino una estratagema matemática para simplificar los cálculos. Por cierto, sobre esto opinaba Kepler que aceptar una Tierra inmóvil para leer el libro de Copérnico era como quemarlo antes de comenzar su lectura. Tycho Brahe no sufrió persecución religiosa, fue más bien una persecución por sus derroches y su tiranía, aunque su exilio en Dinamarca tenía también una ligera motivación de este tipo. Galileo fue obligado a renunciar a sus ideas y vivió sus últimos años con la Inquisición en casa. Y Giordano Bruno murió quemado vivo. Sin embargo, Kepler fue admi-

rado y respetado por su ciencia, tanto por los calvinistas como por los luteranos, los católicos y los jesuitas. Pero, aun así, fue expulsado de todos los sitios donde vivió.

No ajeno a los avatares de su vida fue el histerismo colectivo que se extendió por toda Europa con la persecución de la brujería. Una tía suya, la que le había criado en buena parte, fue quemada por sus tratos con el demonio. Y, más adelante, su propia madre fue denunciada, condenada y encarcelada por bruja. También se le amenazó con el tormento si no confesaba, pero ella, tan íntegra como su hijo, se negó rotundamente. Kepler la defendió con todo su tesón, su prestigio y su inteligencia hasta conseguir su libertad, pero el proceso duró varios años. Y al final, solo consiguió que no muriera en la cárcel, porque no sobrevivió libre más que unos meses. Así pues, sin ninguna duda la brujería condicionó enormemente la vida de Kepler.

Otro aspecto que hay que destacar en la vida y en la obra de Kepler es la astrología, vista como algo diferente de la astronomía, pero ambas conviviendo inseparablemente en su mente. ¿Creía realmente en la astrología? Algunos piensan que no, que se veía obligado a ejercerla. No hay que olvidar que los cargos de Matemático Territorial y Matemático Imperial que desempeñó tenían como parte de las tareas asignadas la elaboración de «calendarios» y cartas astrales, ni que sus más entusiastas mecenas eran, más que aficionados, adictos a la astrología que esperaban de su protegido asesoramiento y predicciones. Sus calendarios tenían que incluir previsiones meteorológicas basadas en la astrología, así como vaticinios personales, políticos o militares. Y no hay que olvidar que la fama y el prestigio popular de Kepler se basaba más en su quehacer de astrólogo que en el de astrónomo. No obstante, hay razones para pensar que Kepler sí creía realmente en la astrología; era otro fruto de su credulidad. Sus escritos y cartas están adornados con cuestiones astrológicas sin finalidad comercial aparente. Incluso creyó presagiar su propia muerte porque justo antes los planetas tenían la misma disposición que cuando nació. Quizá, para cerrar este tema, podríamos decir que despreciaba a los astrólogos pero cultivaba la astrología.

Kepler ha pasado a la historia como el científico que descubrió las tres leyes del movimiento planetario que llevan su nombre

y que nos han enseñado desde la niñez. Ciertamente, su descubrimiento es digno de todo encomio y las enunciamos aquí como su más conocida contribución a la ciencia actual:

— Primera: La órbita de un planeta es una elipse, en uno de cuyos focos está el Sol.

— Segunda: El segmento que une el Sol y un planeta traza áreas iguales en tiempos iguales.

— Tercera: El cuadrado de los períodos del movimiento de traslación de los planetas alrededor del Sol es proporcional al cubo de sus distancias medias al Sol.

Téngase presente que para Kepler el sistema planetario era prácticamente el mundo entero. El resto eran estrellas fijas sin tanto interés como el Sol y los planetas, que ocupaban el centro del universo. Pero pese a toda la admiración, veneración incluso, con que la ciencia actual aplaude el hallazgo de estas tres famosas leyes, no es, quizá, su más destacada contribución a la astronomía moderna.

Kepler fue, muy probablemente, el primer astrofísico, quien primero pensó que la física y la astronomía no eran diferentes y que había que buscar causas físicas en el movimiento de los astros. Anteriormente siempre se había buscado un modelo geométrico que reprodujera los movimientos. En su mente convivieron la abuela (la astrología), la madre (la astronomía) y la hija (la astrofísica). Su pretensión de aunar física y astronomía fue criticada en su tiempo por colegas muy cercanos. Este interés astrofísico de Kepler se refleja en esta obra con todo un capítulo, el tercero, destacando especialmente su concepto de la «gravedad». Realmente, Kepler nunca empleó esa palabra, pero resumamos sus pensamientos pioneros aunque dispersos en varios de sus numerosos y prolijos escritos:

— El Sol es el centro del universo. De él emanaba una fuerza, similar a la magnética, que era la que movía los planetas.

— Esa fuerza se debilita con la distancia. Por eso los planetas más lejanos giran más despacio (según la tercera ley), y por eso cuando un planeta está más cerca del Sol se mueve más deprisa (según la segunda ley).

— Esa fuerza se va debilitando de la misma forma que la luz se va debilitando según se aleja del foco emisor. Y en otro escrito independiente dice que la luz se debilita según el inverso del cuadrado de la distancia.

— Los planetas ofrecen una resistencia a ser movidos por el Sol proporcionalmente a su masa.

— No solo el Sol, sino también la Tierra es origen de esa fuerza, con la que produce el movimiento de traslación de la Luna alrededor de la Tierra.

— En la Luna, en el hemisferio desde el que se ve la Tierra, cuando esta y el Sol están en dirección próxima, su acción conjunta hace que las aguas lunares aneguen ese hemisferio.

— Cuando un objeto cae al suelo, de igual forma, la Tierra va al encuentro del objeto, pero estos movimientos son inversamente proporcionales a la masa, por lo que no es apreciable el movimiento de la Tierra y sí el del objeto.

Como vemos, sus pensamientos estaban muy próximos a los de Newton. También había divergencias. Por ejemplo, lo que producía esa fuerza en el Sol dependía de su rotación, no de su masa. Pero, con todo, esta es probablemente la más significativa aportación de Kepler a la ciencia, más incluso que las tres admirables leyes del movimiento planetario.

Alguien dijo que «el descubrimiento más importante de Newton fue el de las leyes de Kepler entre el montón de papeles que este escribió». Es una frase ingeniosa, aunque, realmente, las tres leyes están bien claras en dos de sus más conocidos libros; sin embargo, su lectura requiere una paciencia infinita. La razón

es que Kepler lo escribía todo, desde sus errores pasados hasta las conclusiones definitivas. Quería imitar en esto a «Colón, a Magallanes y a los navegantes portugueses», que no solo relataban sus movimientos felices, sino también todos los errados que habían tenido que enmendar. Así escribía él, incluyendo sus errores contados con todo tipo de deducciones matemáticas, tablas, etc., con objeto de que se apreciara el curso tortuoso de sus pensamientos. Y todo lo aderezaba con hermosas ocurrencias literarias y religiosas. No es de extrañar que Newton dedicara un tiempo cuantioso en encontrar sus tres famosas leyes.

Suele ignorarse otra faceta de la actividad científica de Kepler, como es el desarrollo de la óptica geométrica. Partiendo prácticamente de cero, salvo los estudios previos de Alhacén, estudió con tal acierto los sistemas ópticos, que los libros actuales de óptica geométrica siguen no solo su planteamiento, sino sus mismos dibujos y hasta su misma nomenclatura. Sería justo que los clásicos dibujos esquemáticos de la óptica geométrica se llamaran «diagramas de Kepler», o algo parecido.

Entre sus méritos como científico destacan su meticulosidad con los datos y su habilidad matemática. Los autores anteriores, como Ptolomeo o Copérnico, se daban por satisfechos si lograban reproducir los datos reales permitiéndose errores de más de doce minutos. Kepler solo se permitía errores de menos de dos minutos. Para algo tenía los mejores datos que jamás se habían obtenido, los de Tycho Brahe.

Huelga aludir a su gran capacidad de trabajo. Con la pasión con que siempre vivió, con esos arrebatos místicos, no resulta extraño. Pero sí que cabe destacar su poder de concentración. Vemos cómo su mente sigue caliente, elaborando resultados, buenos y malos, pero siempre interesantes, mientras está ocupado en la defensa del proceso de brujería de su madre. Pero vemos con más asombro aún cómo sigue investigando sin cansancio al tiempo que su propia casa se ha convertido en un campo de batalla, con tiros por la cocina y por las habitaciones, y así durante todo el tiempo que duró el asedio a la ciudad de Linz.

Sus señores terrenales le encomendaron una misión que finalmente cumpliría a la perfección, aunque su realización le llevara

unos veinte años. Tenía que publicar las llamadas *Tablas rudolfinas*. Tycho Brahe le pidió moribundo que llevara a cabo unas tablas según su modelo, no según el de Copérnico, aunque Kepler acabaría realizándolo según este último con las mejoras de la teoría física que él introdujo. Al morir Brahe, el emperador Rodolfo II le nombró Matemático Imperial para que completara esas tablas. Aunque fue variando de lugar de trabajo a lo largo de su vida, no perdió su calidad de Matemático Imperial. Finalmente, en sus últimos años publicó las tablas, la gran obra comprometida de toda su vida. Pero pronto quedaron obsoletas. En cambio, otras obras, fruto de su inquietud, de su capricho, de su inspiración, se hicieron inmortales.

Como hombre fue austero, tenaz, enfermizo y pobre. No fue mal padre y sí buen hijo. Fue honesto y fiel a sus ideas. Fue locuaz y simpático, amante de la polémica, duro consigo mismo y comprensivo y conciliador con los demás. No hacía su trabajo para su propia gloria, sino para la gloria de Dios. Cuando le insinuaron que Galileo podía estar aprovechándose de sus ideas, respondió que no le importaba, que lo importante era que se pusiera de manifiesto la belleza del mundo, fuera quien fuese quien lo hiciera. No obstante, en sus escritos sale también a relucir su orgullo, su necesidad de que le fueran reconocidos sus méritos y el alto concepto que tenía de sí mismo. Un astrónomo cegato que conocía el cielo minuto a minuto. Un hombre del Medievo que se liberó de la idealización del círculo. Un pensador que recogió el tesoro de Tycho y se lo entregó digerido a Newton. Un admirador de Galileo que menospreció a Bruno. Un hombre que vivió una infancia desordenada y buscó la armonía del mundo.

Galileo dijo que «el universo está escrito en lengua matemática». Tuvo algunos antecedentes, y posiblemente el primero fuera el Eclesiastés, donde se dice «Dios hizo al mundo con número, peso y medida». También san Isidoro sentenció: «Suprime de todas las cosas el número y todo se extingue». Y otras citas podrían agregarse, pero entre ellas no puede faltar el pensamiento vitalista de Kepler. La geometría era anterior al mundo, luego era divina. Dios dotó al mundo con hermosura geométrica, como obra suya que era, y esa belleza estaba a su humano alcance. Kepler creía en la Geometría.

Esta forma de abordar la ciencia no es hoy ni usual ni admisible, ni siquiera para los científicos creyentes. Ya en su tiempo tanto a Tycho como a Galileo les pareció imprudente. Puede llevar a conclusiones absurdas y, de hecho, a ellas le llevaron en numerosas ocasiones. Pero si se quiere conocer la obra, hay que conocer al hombre, y este era así. Cualquier biografía suya que se precie tiene que destacar esa credulidad como su diaria herramienta de trabajo, por poco aleccionador que esto pueda parecer en nuestros días.

El trabajo de Kepler se contempla hoy como una página más de la historia de la ciencia. Una hermosa página de bellos colores que destacan sobre un fondo de disculpables borrones.

Estos tres aspectos pueden distinguirse en su obra: el astrológico, el astronómico y el astrofísico. En efecto, de la astrología salió la astronomía, aunque la primera no sea una ciencia, y de la astronomía salió la astrofísica gracias a los planteamientos de Kepler, honor que comparte con Galileo.

Weil der Stadt, Tubinga, Graz, Praga, Linz, Zagan, Ratisbona. Estos son a grandes rasgos los lugares en los que transcurrió su vida. Hablar de su infancia, su juventud, sus estudios, su creencia en la astrología, su misticismo geométrico al combinar órbitas planetarias y sólidos perfectos, entre otros aspectos, es esencial para comprender a Kepler. Sin conocer sus comienzos pseudocientíficos no se pueden entender sus admirables obras posteriores.

Kepler es además el primer autor de una novela de ciencia ficción. En ella tuvo un propósito didáctico, por lo que constituye una contribución destacable a su obra científica. De hecho, podríamos decir que con ella convenció al mundo de la verdad del heliocentrismo, mucho más y más mansamente que todas las discusiones violentas que «ardieron» en los siglos XVI y XVII.

1571 Johannes Kepler nace en la pequeña localidad alemana de Weil der Stadt.

1584 Ingresa en el seminario de Adelberg y después se traslada al de Maulbronn.

1588 Comienza sus estudios superiores en la Universidad de Tubinga, primero de enseñanza general y luego de Teología.

1594 Abandona sus estudios teológicos y acepta el puesto de Matemático Territorial en Graz.

1597 Se casa con Barbara Müller. Publica *Mysterium cosmographicum*, obra donde demuestra las ventajas del modelo copernicano. Al año siguiente muere su primer hijo al poco de nacer.

1599 Muere su segundo hijo. Acepta la invitación de Tycho Brahe y viaja hasta Praga. El entendimiento entre ambos no es bueno y Kepler regresa a Graz.

1600 Es expulsado de la ciudad de Graz. Vuelve de nuevo a Praga y colabora con Brahe, esta vez en armonía. Al año siguiente muere Brahe. Kepler es nombrado Matemático Imperial.

1604 Se publica su *Astronomia pars optica*, una de las obras que más han contribuido al desarrollo de la óptica moderna. Dos años más tarde se publica *De stella nova*, un estudio sobre la supernova avistada en 1604.

1609 Publicación de *Astronomia nova*, que incluye las dos primeras leyes de Kepler. Un año más tarde publica *Dioptrice*, su segunda obra sobre óptica.

1611 La desgracia se ceba de nuevo en Kepler y muere Barbara y otro de sus hijos.

1612 Muere Rodolfo II, protector de Kepler. Sin ningún amparo en Praga, decide solicitar el puesto de Matemático Territorial en Linz (Austria), cuyas autoridades lo crean ex profeso para él.

1613 Kepler se casa con Susanna Reuttinger. Dos años más tarde su madre es acusada de brujería.

1618 Muere la segunda hija de su primer matrimonio. Un año después publica *Harmonice mundi*, que contiene la tercera ley de Kepler.

1621 Tras un largo proceso, su madre es liberada, pero muere al cabo de poco tiempo. Se publica *Epitome astronomiae copernicanae*, un resumen de toda su obra anterior.

1627 Se traslada a Ulm para controlar personalmente la impresión de las *Tablas rudolfinas*, unas tablas astronómicas con los datos recopilados por Tycho Brahe.

1628 Acepta la protección del general Wallenstein y se traslada a la ciudad polaca de Zagan.

1630 Kepler inicia un viaje a Linz y, en una de sus paradas, muere en Ratisbona el 15 de noviembre de una extraña enfermedad.

CAPÍTULO 1

El astrólogo y visionario

Cuesta hoy decir que uno de los grandes astrónomos de todos los tiempos fue también astrólogo, de la misma forma que Newton fue también alquimista. También como Newton, no solo fue creyente, sino teólogo. La astrología fue lo que le dio de comer y lo que le proporcionó prestigio, aunque en Kepler, astrología y astronomía son inseparables. También se puede hablar de la creencia de su ciencia. En efecto, su espíritu crédulo, visionario y medieval le hizo concebir algunas obras con ideas que hoy tenemos por absurdas y estrafalarias.

En una casa como otra cualquiera de un pueblecito suabo, al sur de Alemania, Weil der Stadt, en el estado de Baden-Württemberg, puerta de la Selva Negra, nació Johannes Kepler en 1571. La localidad, de unas doscientas familias, fundada por la dinastía de los Hohenstaufen, había adquirido el título de ciudad imperial. Como toda la región, era pueblo luterano, seguidor de la confesión de Augsburgo, aunque como había también numerosos católicos, participaba de lleno en las disensiones religiosas que azotaban Europa.

La familia de Kepler había tenido cierto estatus en el pasado, pero cuando él nació había venido a menos. Si nos hubiéramos podido asomar a su casa en el año 1575, cuando Johannes tenía cuatro años, habríamos visto una situación deprimente. Vivían allí numerosos miembros de la familia. La casa era de los abuelos, Sebald Kepler y Katharina Müller. El abuelo Sebald había sido burgomaestre de la ciudad, y había cosechado antaño laureles por haber luchado a las órdenes de Carlos V, emperador inmortalizado en la plaza mayor de la población. Pero en aquel momento ya era pobre y, según palabras de su propio nieto Johannes, se había vuelto «arrogante, presuntuoso, irascible, violento, testarudo». No tuvo mejores palabras Johannes para su abuela, que era «inquieta, lista, embustera, de naturaleza encendida, impulsiva, eterna manipuladora, envidiosa, hostil, rencorosa».

Aquel año, su padre, Heinrich Kepler, no estaba allí; se había ido a luchar a Flandes, a las órdenes del duque de Alba, capitán español que se caracterizó por la severa y cruel represión de luteranos y calvinistas. No fue bien visto en Weil este alistamiento de un luterano de la familia de los Kepler a las órdenes de un católico tan intolerante. Pero Heinrich no debió de ser un padre modélico. Y el matrimonio con su madre, Katharina Guldemann, era desafortunado, con continuas y atroces broncas. Tampoco su madre salió bien cualificada a los ojos de su hijo. Y tampoco ella estaba allí aquel año; se había ido en busca de su marido. Más adelante, el padre estuvo a punto de morir en la horca y finalmente abandonó a su familia, y la madre, como veremos, acabaría siendo acusada de brujería.

«[Mi padre era] un soldado corrupto, rudo y camorrista [y mi madre, una mujer] pequeña, escuálida, charlatana, pendenciera y de malos modales.»

— JOHANNES KEPLER, DESCRIPCIÓN APARECIDA EN SU AUTOHORÓSCOPO.

La educación del pobre pequeño Johannes corrió, en parte, a cargo de una tía suya que murió en la hoguera, acusada de encarnar al diablo. En la casa vivían muchos de sus tíos y hermanos. Tras él, que era el primogénito, venía su hermano Heinrich, que era un «tunante» y padecía epilepsia. Además de toda esta serie de familiares indeseables, habitaban el piso inferior los animales, como era la costumbre entonces, tanto en Suabia como en otras partes de Europa.

Falta retratar al propio Johannes. Nació sietemesino y muy débil. En 1575, cuando nos estábamos asomando a su casa, padecía la viruela, lo que le produjo varios trastornos de por vida, en especial visuales, pues padeció miopía y poliopía, un defecto que produce imágenes múltiples. ¡Bonita enfermedad para un astrónomo, al menos en aquellos tiempos! Según sus propias palabras, Sirio y la Luna ¡le parecían del mismo tamaño angular!

El propio Johannes nos contó este panorama al realizar su autohoróscopo, para lo que se vio obligado a anotar toda esta serie de detalles. Es lógico pensar que, con una infancia así,

Kepler debería haber crecido con graves trastornos psíquicos y acabaría teniendo una personalidad desequilibrada e inadaptada. Pero, por el contrario, como iremos viendo, parece que fue una persona encantadora, de trato franco y amable, y muy querido por todos. La honestidad, la sinceridad y la bonhomía fueron cualidades innatas que conservó toda su vida.

EL IMPERIO Y LAS LUCHAS DE RELIGIÓN

El mapa de la Europa del siglo XVI era complicado y cambiante pero, en relación a los lugares por los que transcurrió la vida de Kepler, podemos decir que estaba dominado por el antiguo Sacro Imperio Romano Germánico. Tras la muerte del emperador Maximiliano I, le sucedió su nieto Carlos V de Alemania y I de España, desde 1530. A su muerte, se produjo una división: el nuevo emperador fue el hermano de Carlos V, Fernando I, nacido en Alcalá de Henares. A su muerte le sucedió su hijo Maximiliano II, nacido en Viena aunque educado en España. Tuvo quince hijos con Ana de Austria y Portugal, hija de Carlos V, siendo el tercero Rodolfo II, emperador de Alemania, el que tuvo más relación con Kepler. Así pues, este Rodolfo II era bisnieto de Juana I de Castilla, apodada «La Loca», y es posible que algunos rasgos de su extravagante personalidad fueran heredados de su bisabuela. Rodolfo II fue emperador desde 1576 y en vida de Kepler le sucedieron Matías (1612), Fernando II (1619) y Fernando III (1637). Esta sangre española en los emperadores de la dinastía de los Habsburgo fue determinante en la vida de Kepler. Recordemos que España era paladín de la Contrarreforma católica. Suabia era una de las regiones más sureñas con profesión luterana. A lo largo de su vida, Kepler fue habitando ciudades fronterizas entre ambas religiones con progresiva influencia de Roma y España, por lo que Kepler sufrió duramente el enfrentamiento religioso y la intolerancia de ambos bandos.



Rodolfo II (1552-1612), emperador del Sacro Imperio Romano Germánico.

Tampoco parece que el suyo fuera un nido propicio para gestar a un gran científico. Está claro que si acabó siéndolo, no fue por haber nacido ni en el lugar ni en el momento precisos, ni porque tuviera una educación o un ejemplo a seguir. Hay que atribuirlo, sencillamente, a su cerebro privilegiado, situado muy lejos en el ala de lo improbable, uno de esos raros genios para los que no cabe buscar ni orígenes ni explicación. No solo fue un astrónomo imprescindible, sino un hombre culto que se interesó por multitud de problemas religiosos, filosóficos, literarios o científicos. Quien parecía que había de morir prematuramente, como muchos de sus tíos y hermanos, mereció el elogio eterno.

Pero aunque el enfrentamiento entre los seguidores del papa y la confesión de Augsburgo fue sangriento, irracional y estéril —porque ambos bandos creían casi en lo mismo—, tuvo también su parte buena. Ambos pensaron que su futuro estaba en la educación de los niños y jóvenes. Los duques de Württemberg se preocuparon de erigir escuelas de buen nivel educativo y lo mismo estaban haciendo los jesuitas para la Contrarreforma. Así que el pequeño Johannes pudo asistir, aunque intermitentemente, a la escuela de Leonberg, donde se habían instalado sus padres a la vuelta de Flandes. Era una buena escuela, donde los niños eran obligados a hablar en latín entre ellos, aunque esto pueda parecer extraño hoy día. Sin embargo, su educación fue muy intermitente porque los Kepler cambiaron varias veces de localidad y porque sometieron a su hijo a duros trabajos agrícolas. En todo caso, en esa escuela hay que buscar el origen del elegante latín que usó el astrónomo para cartearse con los más ilustres científicos de la época y también para escribir sus admirables e insólitas obras. Su prosa fue siempre imaginativa, aunque quizá algo verbosa.

Nada hubo en su niñez que hiciera presagiar sus inauditas dotes de matemático, o no tenemos noticia de ninguna precocidad geométrica, al menos que él pensara que fuera digna de recuerdo. Y, además, sus padres no debieron de ser tan malos, a tenor de algunos detalles de ternura: su madre lo llevó a una colina a ver un cometa y su padre a ver un eclipse de Luna. El color bermejo de la Luna en penumbra le causó una impresión indeleble que le inspiró interesantes opúsculos posteriores.

LA EDUCACIÓN DE KEPLER

La familia de Johannes decidió que fuera eclesiástico, lo que no le satisfizo profundamente. Por una parte, no tenía suficiente fortaleza para las labores agrícolas, y, por otra, se puede pensar que vio en esta oportunidad la forma de alejarse de su alborotado hogar. Pero

MICHAEL MÄSTLIN



Entre los profesores de Kepler destaca especialmente uno de ellos: su profesor de astronomía, Michael Mästlin (1550-1631). Con él estableció una relación tan interesante y prolongada durante toda su vida que, si no por sus propios descubrimientos, este hombre sí merecería un puesto de honor como pedagogo de la astronomía. Reconoció la valía de Kepler, empleó su tiempo en enseñarle de forma individual, siguió todos sus descubrimientos a lo largo de su vida, pues Kepler era a él a quien primero se los comunicaba, le aconsejó en sus avances científicos y en sus cambios de puesto de trabajo y mantuvo una interesante y científica relación epistolar. Este intercambio de cartas cesó unilateralmente cuando Mästlin reconoció que no era capaz de seguir la investigación de Kepler. Era unos veinte años mayor que él y siempre fue, no su amigo, sino su maestro, su antiguo profesor. Baste decir que fue a través de él como Kepler conoció las ideas y el libro de Copérnico (1473-1543). No se lo comunicó en clase, pues las ideas heliocéntricas eran consideradas perniciosas y le hubieran podido hacer perder su puesto en la universidad. Se lo dijo personalmente. Kepler recibió la información y la captó tan espontánea y firmemente que nunca en su vida se le pasó por la cabeza dudar de la certeza de la hipótesis de Copérnico. Más adelante dijo en su *Epitome*: «Consideré mi deber y mi misión defender también hacia fuera la doctrina de Copérnico, la cual he reconocido como verdadera en mi interior y cuya belleza me colma de un arrobo increíble al contemplarla». Mästlin merece por derecho propio un lugar distinguido en la historia de la astronomía.

además, Kepler era muy religioso, lo fue durante toda su vida. Los pasos en la carrera del sacerdocio estarían en el futuro bien marcados: escuela en Adelberg, seminario superior en Maulbronn, universidad en Tubinga. En esta universidad siguió dos años de enseñanza general, con clases de ética, dialéctica, retórica, griego, hebreo, astronomía y física. Posteriormente, estudió durante tres años materias propiamente teológicas. En cada paso superó airosamente las pruebas para pasar al siguiente. Hay que decir que estas escuelas y seminarios estaban ubicados en antiguos monasterios, como los de Adelberg y Maulbronn, que la Reforma Luterana había dedicado a la enseñanza. Y hay que hacer notar que, en general, estos estudios eran gratuitos e incluso los estudiantes cobraban una pequeña cantidad. La belleza de los emplazamientos, la calidad de la enseñanza y la gratuidad eran ciertamente dignas de admiración, tanto en aquellos tiempos como en los actuales.

Kepler no tuvo, en su juventud, buena relación con sus compañeros, especialmente antes de la universidad. En cambio, era muy bien valorado por sus profesores. A modo de ejemplo, citemos el informe del claustro destinado al concejo de Weil para la renovación de su beca:

> Teniendo en cuenta que el arriba mencionado, Kepler, posee una inteligencia tan excelente y soberbia que cabe esperar de él grandes cosas, querríamos por nuestra parte apoyarlo en su solicitud, dados además sus conocimientos notables y su talento.

Entre sus lecturas preferidas cabe citar algunos escritos de Nicolás de Cusa. Este autor debió de dejar honda huella en su joven cerebro pues, como en él, bullía en su pensamiento una rara combinación de mística y geometría.

Su educación se desarrolló como estaba previsto, salvo en el último momento, en 1594. Kepler no terminó sus estudios teológicos ni fue ordenado sacerdote como era el plan inicial, sino que aceptó una plaza de matemático que había quedado vacante en la Escuela Evangélica de Graz. A pesar de su lejanía, la Universidad de Tubinga tenía un gran prestigio, así que el claustro de la Escuela Evangélica les solicitó un aspirante. Tras el consejo de Tu-

binga, la aceptación de Graz y la conformidad del propio Kepler, se convirtió en «Matemático Territorial». Él, que nunca había pensado en dedicarse ni a la enseñanza, ni a las matemáticas, ni a la astronomía, fue arrastrado por el azar a situaciones que tan beneficiosas acabarían siendo para la humanidad. Como Matemático Territorial no solo debía enseñar en la Universidad de Graz, sino además levantar cartas astrales y hacer predicciones astrológicas.

NICOLÁS DE CUSA



Cardenal y filósofo alemán, Nicolás de Cusa (1401-1464) influyó notablemente en la ciencia de Kepler. Fue uno de los protagonistas de la transición de la filosofía medieval a la ciencia moderna, aunque más cerca de aquella. Su mística le condujo a conclusiones que parecen atisbar el principio cosmológico: todo lo creado es a imagen de Dios, pero como la imagen es imperfecta, el Ser Supremo es inalcanzable. El mundo, al ser imagen de Dios, es infinito, de donde se sigue que no hay un centro del universo. Por tanto, la Tierra no puede ser el centro del universo, ni hay ningún punto de referencia, no hay ningún lugar privilegiado en el universo: ni la Tierra ni el Sol. Tampoco hay quietud: todo está en movimiento, incluido el Sol. Su interpretación del universo queda reflejada en esta frase suya tan absurda y extraña, precursora del principio cosmológico: «El universo es un círculo cuyo centro está en todas partes y cuya circunferencia en ninguna». O en esta otra: «La Tierra no es el centro ni de la octava esfera ni de ninguna esfera. Donde quiera que se sitúe el observador, se creerá el centro de todo». Sus razonamientos parecen peregrinos, pero su conclusión, sorprendente. Recordemos el llamado principio cosmológico, del que parten en la actualidad prácticamente todos los cosmólogos: el universo es homogéneo e isótropo; todos los lugares del universo son equivalentes (homogeneidad), y todas las direcciones equivalentes (isotropía). Por tanto, no puede haber en el universo puntos singulares, ni puede haber un centro ni tampoco un borde.

No debía de ser muy buen profesor. El primer año tuvo pocos estudiantes y el segundo ¡ninguno! Por este motivo, se le encargaron clases de otras materias muy variadas, como retórica, historia o ética. Además de las clases, realizaba *almanaques*, lo que hoy llamaríamos horóscopos. La astrología de Kepler merece algún comentario aparte. Quiso la casualidad que sus primeras incursiones como «calendarista» fueran muy exitosas: predijo un frío muy intenso y un ataque del ejército turco, que efectivamente se produjeron.

«MYSTERIUM COSMOGRAPHICUM»

Entremos a considerar la obra de Kepler. Sin ninguna duda, su primera gran obra es el *Mysterium cosmographicum*. Su nombre exacto era *Prodromus dissertationum cosmographicarum, continens Mysterium cosmographicum de admirabili proportione orbium coelestium: deque causis coelorum numeri, magnitudinis, motuumque periodicorum genuinis et propriis, demonstratum per quinque regularia corpora Geometrica*, que significa *Preludio de las disertaciones cosmográficas que contiene el misterio cosmográfico acerca de la admirable proporción de los orbes celestes y de las razones genuinas y propias del número, la magnitud y el movimiento periódico del cielo, demostrado por cinco cuerpos geométricos regulares.* Salió a la luz en 1597.

Este libro fue un gran éxito. Parte de unos principios absurdos, aplica una argumentación absurda y llega a unas conclusiones absurdas. ¿Por qué, entonces, tuvo tanto éxito? Porque era bello. Hoy día, tras tantos años de generaciones de astrónomos y tantos años de revisión crítica de los trabajos pasados, podemos ciertamente enjuiciar esta obra como absurda. Probablemente, si hubiéramos vivido entonces, nos hubiéramos quedado petrificados ante la fuerza arrolladora de la palabra de Kepler, como les pasó a sus asombrados contemporáneos. Esta obra desempeñó un papel interesante en el desarrollo de la astronomía; a veces los pasos erráticos acaban llevando al mayor avance. Su publicación fue decisiva,

aunque solo fuera porque permitió a su autor tanto continuar en su puesto de trabajo como con el curso de su pensamiento.

Empecemos por expresar el resultado absurdo. Los planetas tenían una distancia al Sol que se podía calcular de la siguiente manera, empleando las propias palabras de Kepler:

> A ella [a la Tierra] la circunscribe un dodecaedro; la esfera que lo comprenda será la de Marte. La órbita de Marte está circunscrita por un tetraedro; la esfera que lo comprenda será la de Júpiter. La órbita de Júpiter está circunscrita por un cubo; la esfera que lo comprenda será la de Saturno. Ahora, ubica un icosaedro dentro de la órbita de la Tierra; la esfera inscrita será la de Venus. Sitúa un octaedro dentro de la órbita de Venus; la esfera inscrita a él será la de Mercurio.

En otras palabras, cada órbita de un planeta es una esfera que circunscribe uno de los sólidos perfectos e inscribe otro sólido perfecto. Y la sucesión de órbitas y sólidos perfectos es: Mercurio, octaedro, Venus, icosaedro, la Tierra, dodecaedro, Marte, tetraedro, Júpiter, cubo, Saturno.

Bien es sabido que solo hay cinco sólidos perfectos, los reseñados en la lista anterior. Eso estaba bien demostrado desde los tiempos de los admirables geómetras griegos. Había seis planetas y cinco sólidos perfectos. Esta era la razón por la que solo había seis planetas, contestando así a una pregunta que él, y nadie antes que él, se había formulado: ¿Por qué solo hay seis planetas?

¿Cómo llegó a semejante conclusión? Por unos derroteros que, aunque geniales y solo fluyentes de su imaginación caliente, fueron típicamente medievales. Podríamos esbozarlos así: Copérnico ha situado el Sol en el centro del universo. Eso significa que el Sol es el corazón o el rey del cosmos, lo que genera la fuerza que lo mueve. El Sol es ahora el que tiene el atributo divino. De él sale el «vigor» que hace girar los planetas. Ese vigor se va debilitando con la distancia. Por esa razón, los planetas giran más despacio cuanto más lejos están del Sol.

Antes de existir el mundo ya existía la geometría, por lo que la geometría tiene carácter divino. Es más, la geometría es parte de Dios, porque Él no puede hacer nada al azar, y lo que hace ha de ser

perfecto, con la perfección de la geometría. ¿Cómo podemos comprender lo que Dios quiso hacer con el mundo? Dios hizo al hombre a su imagen y semejanza. Por tanto, podemos comprender su geometría. Dios ha querido dotar al hombre de una inteligencia que ama y comprende su geometría. Podemos entender Su creación porque Él ha dispuesto así nuestra naturaleza. Si queremos comprender el mundo, debemos preguntarnos qué obra perfecta quiso poner al alcance de nuestra inteligencia como fruto de la suya. Pensemos entonces en algo perfectamente hermoso.

«Las matemáticas constituyen el orden de la naturaleza, porque desde el principio de los tiempos Dios las porta en Sí Mismo, en la abstracción más simple y divina.»

— KEPLER, EN SU *MYSTERIUM COSMOGRAPHICUM* ACERCA DE LA CREACIÓN DEL UNIVERSO POR PARTE DE DIOS.

Pretendamos conocer el universo mediante deducciones matemáticas a partir de procurar entender el deseo de Dios. Hay que descubrir el pensamiento de Dios antes de comprender el mundo. Entendemos así por qué hay precisamente seis planetas y no cualquier otro número, entendemos por qué sus distancias al Sol son las que son. Y entendemos así por qué los planetas son tanto más lentos cuanto más alejados están del Sol.

En efecto, algo así como la extraña sucesión anterior de frases insensatas puede reflejar la mentalidad de este místico geómetra o geómetra místico. Solo hay cinco sólidos perfectos. Hay solo seis planetas. Sus distancias deben estar regidas por ese entramado de poliedros descritos en el *Mysterium cosmographicum*.

Kepler se expresó en su libro con palabras similares a las esbozadas aquí. «La mayoría de las cosas que existen en el mundo pueden inferirse a partir del amor de Dios hacia los hombres».

Si bien es cierto que el libro fue muy popular y que gracias a ello Kepler pudo, mal que bien, dedicarse a buscar la armonía del mundo durante el resto de su vida, también recibió críticas. El mismo Kepler se ocupó de hacer llegar a los más distinguidos sabios un ejemplar. Algunas objeciones vinieron de su colega Tycho

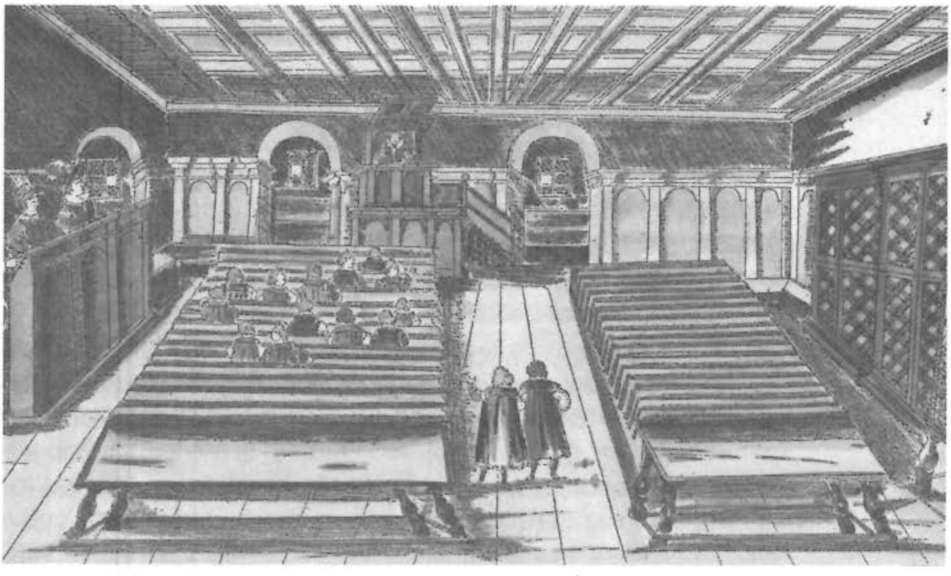




FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Retrato de Kepler niño, de autor desconocido.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Estatua conmemorativa de Johannes Kepler en su localidad de nacimiento, Weil der Stadt, en Baden-Württemberg.

FOTO INFERIOR:
Grabado realizado hacia 1600 por Ludwig Ditzinger que representa una de las aulas de la Universidad de Tubinga, en la que Kepler ingresó en 1588 para cursar sus estudios superiores.



Brahe, de las que nos ocuparemos luego. ¿Qué críticas podrían ponerse a ese tratado? Desde nuestra posición de observadores del siglo XXI esto sería muy sencillo. No hay seis planetas, seis eran los que Kepler conocía. Debería haber pensado que podía haber más, indetectables por ser pequeños o estar alejados.

Además, tenía un grado de libertad adicional, al ordenar los poliedros de forma que todo cuadrara mejor, con lo cual la coincidencia con las distancias planetarias era más fácil de obtener. Pero pasada la euforia inicial, pronto se dio cuenta de que las distancias reales dadas por Copérnico no coincidían con las deducidas mediante el método de los poliedros. Como estas distancias no eran perfectamente constantes, pensó más adelante que las esferas correspondientes a las órbitas debían de tener una cierta holgura, lo que proporcionó un ajuste un poco mejor. Tarde o temprano tuvo que darse cuenta de que las distancias deducidas no eran las verdaderas pero nunca llegó a abandonar completamente su concepción poliédrica del mundo. A propósito de su *Mysterium* decía:

> Jamás podré traducir a palabras el deleite que sentí a raíz de mi descubrimiento. Ya no me pesaba el tiempo perdido, ya no sentía ningún hastío ante el trabajo, no vacilaba ante los cálculos por difíciles que fueran. Pasé días y noches resolviendo números hasta ver si la sentencia expresada en palabras coincidía con las órbitas de Copérnico, o si los vientos se llevarían consigo mi regocijo.

Antes de ponerse al trabajo había que procurar adivinar las intenciones del Creador al crear el mundo. Evidentemente, los científicos actuales no hubieran aceptado esa metodología mística. No se puede pretender indagar en la mente de Dios para deducir leyes de la naturaleza.

¿Y qué se decía de las estrellas fijas en este hermoso libro? Casi no se consideraban, como era usual en aquellos tiempos. Las estrellas que se llamaban fijas, por estar como «infijas» en una «ochava esfera», no habían llamado mucho la atención como objeto de la astronomía. La concepción medieval de las estrellas las suponía como agujeritos por donde se filtraba la luz divina ulterior. Por entonces, explicar el universo equivalía a explicar el sis-

EL CÁLIZ DEL MUNDO



El copón del mundo según el dibujo de Kepler.

Tras la publicación del *Mysterium*, Kepler tenía que comunicar su gran descubrimiento no solo a los expertos sino a todos los hombres, especialmente a los más poderosos. Quería materializar su genial concepción del universo en un «cáliz», una especie de maqueta donde se fabricaran estructuras para alojar sólidos perfectos y planetas. Ofreció la construcción de la maqueta del universo al duque de Württemberg. El cáliz sería de plata y mediría poco más de un ana, unidad más o menos equivalente a un metro. Los planetas serían representados con piedras preciosas y de las esferas de las órbitas manarían diferentes bebidas cuidadosamente elegidas. Del Sol, *aqua vitae*; de Mercurio, coñac; de Venus, aguamiel; de la Luna, simplemente agua; de Marte, vermut fuerte; de Júpiter, delicioso vino blanco joven, y de Saturno, vino rancio fuerte o cerveza. El duque consultó con el prestigioso Mästlin y como este diera una opinión muy favorable, ordenó que se construyera la maqueta, si bien antes pidió a Kepler que hiciera una de cobre. Pero Kepler no tenía ni dinero ni habilidad para hacerla. Era un matemático que poco sabía de artesanía, y los artesanos no sabían matemáticas. Ciertamente, la realización no era nada sencilla. La hizo de papel, pero los artesanos no fueron muy hábiles y no supieron reproducirla.

Un proyecto alternativo

Kepler se volvió a Graz. Le habían dado vacaciones por dos meses y él se había tomado siete, haciendo las gestiones de la impresión, que fueron provechosas, y haciendo las gestiones del copón, que no lo fueron. Quiso hacer entonces una modificación que incluyera movimientos y que reprodujera la situación de los planetas en los distintos días para todo un siglo. No merecía la pena hacerlo con una precisión para miles de años «porque no es de esperar [aparte del Juicio Final] que una obra así permanezca sin moverse en un mismo sitio durante más de un centenar de años. Suelen producirse demasiadas guerras, incendios y otros cambios». Sin embargo, ninguno de estos proyectos se llevó a cabo.

tema solar, el orden de los planetas, el Sol y la Luna; era explicar el *cosmos*, que en griego significa «orden», era explicar el sistema tan excelentemente ordenado del sistema planetario. Kepler pensaba que Copérnico había trasladado la luz divina desde más allá de la *ochava esfera* hasta el Sol, lo cual, por paradójico que resulte, le acabaría llevando a la tercera ley que lleva su nombre. En términos aún cualitativos, la idea de esta tercera ley estaba ya rondando la cabeza de Kepler en este primer libro.

Encontrar una regla que nos proporcione las distancias de los planetas al Sol es lo que hoy se llamaría un problema de «ajuste». Kepler podría haber pensado en una sucesión, como más adelante buscaron Titius y Bode. Sin embargo, eligió un camino menos práctico pero más hermoso. Y a pesar de que más adelante fue mucho más respetuoso haciendo encajar la teoría con los datos, nunca dejó de pensar que la serie de órbitas y sólidos perfectos de su *Mysterium* era correcta como reflejo de la creación de un Dios geómetra.

Kepler no solo creía en la Santísima Trinidad, sino que la veía reproducida en el mundo: El Sol era el Padre, el Hijo, los planetas, y el Espíritu Santo ese «vigor», esa *anima motrix*, esa *vix motoria*, esa fuerza que surgía del Sol hacia los planetas que movía.

La edición del *Mysterium* fue costeada por la Universidad de Tubinga. Kepler tuvo que pagar de su propio bolsillo 200 ejemplares por un valor de 300 florines. Envió a su viejo profesor Mästlin 50 ejemplares con la intención de que los distribuyera oportunamente, y envió ejemplares a muchos otros colegas, entre ellos Galileo y Tycho. Dedicó la obra a las autoridades de Estiria, la región cuya capital es Graz, con objeto de obtener algún beneficio como reconocimiento; de ellas recibió, en efecto, 250 florines. No perdió demasiado dinero... pero perdió. Mästlin, que estaba hechizado con la ocurrencia de su antiguo estudiante, se ocupó en persona, diaria y meticulosamente, de que la edición fuera perfecta.

El manuscrito contenía un capítulo sobre la compatibilidad de la Biblia y el modelo de Copérnico y su desarrollo posterior en el *Mysterium*. Pero, quizá con buen criterio, el rector de la Universidad de Tubinga le hizo desistir. Ese capítulo hubiera sido mucho más polémico, hubiera desatado grandes simpatías y grandes antipatías entre los lectores, hubiera hecho que la atención se centrara

en él y que el hermoso artificio de conjunción de planetas y sólidos perfectos hubiera pasado más desapercibido. Kepler aceptó el consejo, dejando la polémica de la compatibilidad entre Biblia y ciencia para conversaciones particulares o para más adelante. Hizo bien: hubiera terminado como Galileo o como Bruno, porque los asuntos religiosos estaban entonces en plena efervescencia.

«HARMONICE MUNDI»

Esta obra fue concebida ya en la etapa de Graz, poco después del *Mysterium*, aunque fue elaborada más adelante y publicada en 1619. Había trazado ya las líneas de argumentación en torno a 1599 cuando tenía unos veintiocho años. Se trata nuevamente de pensamientos y fantasías basadas en la belleza y la voluntad divina, por lo tanto, no había de tener este libro una gran trascendencia directa sobre la física y la astronomía actuales. Sí que la tuvo indirectamente, porque esta imaginativa forma de pensar, apartada desde hace tiempo de la ciencia racional, por paradójico que parezca, condujo a Kepler a formular la tercera de sus conocidas leyes. Como, en cualquier caso, Kepler contrastaba escrupulosamente los resultados de sus fantasías y creencias con los datos, no se puede negar el valor del hallazgo de esta ley. En todo caso, son de reconocer el tesón, la imaginación, el espíritu de este místico, filósofo, geómetra y astrónomo, valores estos combinados ahora, en este libro, con un perfecto conocimiento de las consonancias de los instrumentos musicales.

Necesitó profundizar en la música y sus consonancias aritméticas, para lo cual dispuso de un interesante libro: *Dialogo della musica antica e moderna*, escrito por Galilei; pero no por Galileo Galilei (1564-1642), sino por su padre, Vincenzo Galilei (1520-1591). Kepler aunó en este libro astronomía, música y geometría. El ingrediente nuevo era la música, o bien, muchas otras causas de armonía, como podrían ser las bellas proporciones arquitectónicas o la métrica de los versos, pero se centró en la música.

Estudió en profundidad a Euclides (ca. 325 a.C.-ca. 265 a.C.), a quien elogió con ditirambos sin límite: al estudiar a Euclides

uno «toma conciencia de que se mueve por la luz de la verdad; le embarga un entusiasmo increíble y con toda precisión, como desde una atalaya, vislumbra jubiloso el mundo por entero». Creía que la más admirable cima de los *Elementos* era la demostración de que solo había cinco sólidos perfectos. Estudió también a Platón (ca. 428 a.C.-ca. 347 a.C.), como filósofo que infundía una vigorosa forma de plantear los problemas, muy en consonancia con su propio espíritu. Y también estudió la *Armonía* de Ptolomeo (ca. 100-ca. 170), sorprendiéndose de cómo «en la mente de dos hombres [tan alejados en el tiempo], entregados por entero a la contemplación de la naturaleza, surgiera la misma idea sobre la configuración armónica».

Había que introducir la música como elemento adicional para explicar el mundo. La línea argumental era semejante, aunque ahora aún más intrincada. La geometría es anterior al mundo, luego tiene carácter divino, o es incluso Dios, pues todo lo que le pertenece, es Dios. La armonía de la música tiene el mismo carácter divino. Dios ha creado al hombre a su imagen y semejanza para que pueda comprender la geometría y disfrutar de la música y así comprender el mundo, que es bello y perfecto como obra divina que es. Hay que encontrar la belleza geométrica y la belleza musical como fuentes del conocimiento astronómico.

Para apreciar la armonía del sonido hacen falta al menos dos tonos, entre los que existe una relación. Luego la belleza de la música no es inherente a aquello que la produce. Por ser una relación es captada por el alma, luego la armonía es creada por el alma. Es el alma dotada de sensibilidad divina para el hallazgo de relaciones, y no el instrumento musical, la que está creada con y para la armonía. Los hombres, aun los incultos, y aun algunos animales, captan la belleza de la música porque es el alma quien crea la consonancia. El alma, por su propia naturaleza, contiene armonías puras y encuentra agrado cuando estas pueden llegar del exterior. Examinaba Kepler las relaciones numéricas simples que producen los acordes con admirable conocimiento de la música. Y buscaba su relación con objetos geométricos y con magnitudes astronómicas de los planetas. Kepler incluso llevó al pentagrama las notas emitidas por los planetas. Así que la música, como antes la geome-

tría, era parte de la armonía divina del mundo. Solo hacía falta que el cielo tuviese aire, pero como el cielo no lo tiene, esa música solo puede ser captada por el intelecto o por «los espíritus puros y, en cierto modo, también por el mismo Dios», quien lo «percibe con no menos deleite y regocijo que el ser humano cuando siente en sus oídos los acordes de la música».

> «Dad aire al cielo y, real y verdaderamente, sonará la música.»
>
> — Johannes Kepler.

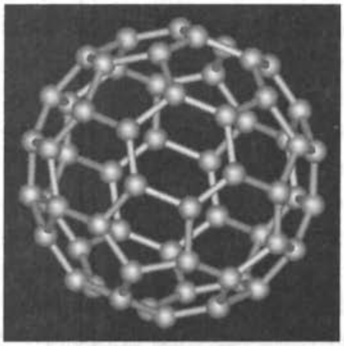
Algo por el estilo pasaba también con la geometría. Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.) decía que el círculo no existía; se llegaba a su concepto por inducción a partir de figuras imperfectas reales. Kepler pensaba, por el contrario, que el círculo es un concepto que existe previamente en el alma porque es anterior al mundo y el hombre lo concibe por su semejanza con Dios. Al leer a Euclides el hombre está reencontrándose con lo que ya sabe por su misma naturaleza. Desde la eternidad está establecido que el cuadrado del lado de un cuadrado es igual a la mitad del cuadrado de su diagonal.

Aunque es un libro básicamente medieval y visionario, en *Harmonice mundi* se encuentran joyas de la ciencia, entre las que destaca la tercera ley de Kepler, que expondremos más adelante. Pero hay algunas otras curiosidades muy resaltables.

Llamaba Kepler *polígonos cognoscibles* a aquellos polígonos regulares que se podían obtener con procedimientos basados en el uso exclusivo de regla y compás, es decir, los que se pueden dibujar con una simple cuerda. Estos eran, creía él, el triángulo, el cuadrado y el pentágono, más aquellos con un número de lados doble de estos. Como los polígonos cognoscibles eran demasiados, buscó alguna propiedad que limitara su número para poder relacionarlos con las notas musicales. Pero el polígono de 15 lados también era cognoscible y, más adelante, Gauss demostró que los polígonos regulares de 17 y 257 lados también lo son, con lo cual, los argumentos de Kepler se hubieran debilitado. Se preguntó Kepler qué polígonos regulares cognoscibles pueden cubrir sin

FULLERENOS

Los fullerenos son moléculas muy estables formadas por gran cantidad de átomos de carbono, siendo el más conocido el C_{60}, formado por 60 átomos, también conocido por *buckminsterfullereno*. La disposición de estos 60 átomos es de una gran belleza, aunque no es preciso presentar un dibujo de su estructura. La mejor representación es un objeto habitual, más concretamente un balón de fútbol. Está formado por hexágonos cuyos lados están compartidos por lados de pentágono, cuyos lados están compartidos a su vez por lados de hexágonos. El resultado es una esfera casi perfecta formada por hexágonos y pentágonos en su superficie, por lo cual los balones de fútbol remedan fullerenos C_{60}. Estos son los que buscaba Kepler. También son de una belleza extraordinaria los *backyonions*, o fullerenos encebollados. Magistral obra de ingeniería de la naturaleza, el fullereno es una molécula muy común en el espacio interestelar y en especial en las nebulosas planetarias. También se ha detectado en las Nubes de Magallanes, como ha demostrado el equipo de Susana Iglesias-Groth. Según esta investigadora, los fullerenos pueden constituir hasta el 25% de la materia interestelar y pueden ser responsables de una «emisión anómala» detectada en el Fondo Cósmico de Microondas.



Un tipo de fullereno, molécula de 60 átomos de carbono, formada con hexágonos y pentágonos combinados que llegan casi a constituir una superficie esférica.

dejar huecos, formando figuras cerradas, la superficie que circunda un punto. Parece que estaba pensando en los hoy llamados *fullerenos*, probablemente una de las formas moleculares más abundantes en el espacio interestelar.

Al reflexionar y concebir polígonos y poliedros con propiedades místicas, Kepler descubrió otros dos poliedros regulares de los denominados *estrellados*. Mucho tiempo después, en 1810, Louis Poinsot (1777-1859) redescubrió estos dos y otros dos más nuevos, y en 1811, Augustin Louis Cauchy (1789-1857) demostró que no podían existir más que estos cuatro (figura 1).

Para hacernos una idea de lo que es un poliedro regular estrellado imaginémonos un dodecaedro y, sobre cada una de sus caras, erijamos una pirámide pentagonal con una altura tal que la longitud de sus aristas sea igual al lado del dodecaedro inicial. Obtenemos así un poliedro en el que todas sus caras son triángulos iguales. Es uno de los cuatro poliedros regulares estrellados.

Según Kepler, también la Tierra tenía un alma y estaba, por tanto, dotada de la sensibilidad innata de origen divino para reconocer «aspectos» de otros planetas, esto es, posiciones relativas entre planetas, que le hacían reaccionar deleitosamente cuando estos aspectos eran geométricamente favorables. En ese caso, el interior de la Tierra exhalaba humores que influían en las condiciones meteorológicas. De esta forma, debería existir una relación entre el tiempo atmosférico y la configuración de los planetas en el cielo. Kepler buscó incesantemente tal relación, y «la encontró».

Este libro, con los planteamientos tan contaminados por el fervor religioso de su autor, con sus fantasías ascéticas y sus ilusas creencias, no es hoy una obra de ciencia en el sentido moderno, y su ingenuidad puede llevarnos incluso a la hilaridad compasiva. Aun así, ese misticismo estaba sometido escrupulosamente al rigor de los datos. Téngase presente que en la fecha de publicación del libro, Kepler ya disponía de las medidas meticulosas de Tycho. *Harmonice mundi* es, sin embargo, una fuente de problemas matemáticos actuales y, lo que es más paradójico, sirvió de inspiración para encontrar su tercera ley del movimiento planetario, correctamente enunciada en sus páginas.

FIG. 1



Gran dodecaedro

Gran dodecaedro estrellado

Pequeño dodecaedro estrellado

Gran icosaedro

UNIVERSO Y MÚSICA

Desde los pitagóricos, la música, con sus notas que son fracciones simples que llevan a la armonía, se ha relacionado con leyes de la física o con propiedades del universo, siendo Kepler su más fervoroso buscador. ¿Hay algo realmente de música en el universo? El medio interestelar no está vacío y es capaz de transmitir ondas semejantes al sonido, las llamadas *ondas de Jeans*. Se diferencian del sonido en que cuando el aumento de densidad debido al paso de la onda acústica sobrepasa un umbral, la autogravitación lleva al colapso y a la formación de estrellas. Puede decirse que las ondas de Jeans son sonido que siembra estrellas a su paso. Pero este sonido es más ruido que música. La música, como nos enseñaba Kepler, supone una consonancia entre al menos dos notas. Estas ondas no se pueden oír por oídos humanos ni por ningún radiotelescopio, pero se pueden ver. No es de extrañar: también podríamos ver el sonido habitual si pudiéramos observar las pequeñísimas variaciones en regiones tan pequeñas, del tamaño de la longitud de onda, que se producen en la densidad, la temperatura o la velocidad del aire al paso de la onda.

Una nota pura

Pero puede hablarse de auténtica música —osemos decir de música celestial— en el Fondo Cósmico de Microondas (CMB, de *Cosmic Microwave Background*): la radiación emitida poco después del Big Bang. Su espectro de anisotropías nos muestra lo que podría identificarse con un armónico principal seguido de otros máximos, que serían sus armónicos secundarios. Este espectro recuerda más la voz pura de una cantante o la vibración de un instrumento musical que el espectro continuo informe de un ruido. En este caso «vemos» las ondas de sonido, porque podemos observar los movimientos asociados a la misma, gracias al efecto Doppler (según el cual, el movimiento de una fuente sonora produce un cambio aparente de la frecuencia de una onda), y porque podemos apreciar las variaciones de densidad, gracias al enrojecimiento gravitatorio predicho por la teoría de la relatividad general (efecto Sachs-Wolfe). Alguien se ha molestado, como curiosidad, en expresar en decibelios esta nota limpia del CMB: sería una nota pura apenas perceptible.

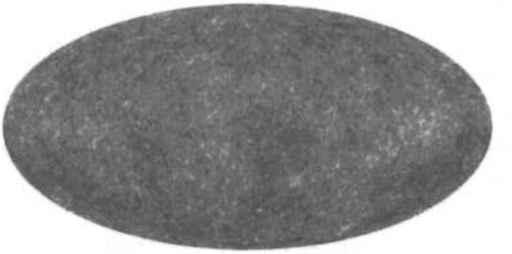


Imagen del satélite WMAP que muestra las fluctuaciones de temperatura del Fondo Cósmico de Microondas, que se muestran en la ilustración con diferentes tonos de gris. Se remontan a unos 13 700 millones de años.

ASTROLOGÍA

Como parte de su cometido como matemático en las ciudades donde trabajó, Kepler tenía que emitir «almanaques» o servir como «calendarista» y asesor de sus mecenas. La pregunta es si Kepler hacía astrología por obligación y sin convencimiento, o si realmente creía que los astros predecían los acontecimientos futuros de una persona e incluso de toda una localidad. Como la astrología quedó excluida de la familia de las ciencias, puede parecer como una mancha en su biografía haberse dedicado a las prácticas astrológicas. La pregunta es, pues, importante, aunque en cualquier caso siempre resulta inapropiado juzgar otras épocas con la mentalidad de hoy.

La respuesta es que sí, que Kepler probablemente creía en la influencia de los astros sobre los hombres y sobre los sucesos futuros, a pesar de que sus escritos parezcan a veces contradictorios o vacilantes sobre esta cuestión. Escribió a su profesor y astrónomo Mästlin para comentarle su propio almanaque:

> Mucho de lo que contiene debe disculparse deliberadamente o perjudicaría mi reputación entre ustedes. La cuestión es la siguiente: no escribo para la gran mayoría ni tampoco para gente instruida, sino para nobles y prelados que pretenden conocer cosas que no comprenden.

Y también nos dijo: «Mamá astronomía de seguro pasaría hambre si no ganase el pan su hija la astrología». Además, Kepler aprendió a expresar sus vaticinios públicos de una forma confusa que dificultara una interpretación literal comprometida. Al ser incesantemente preguntado por el significado de la estrella nueva —la supernova de Kepler— comentó:

> Cuando el espíritu habituado a la argumentación matemática reflexiona sobre la deficiencia de los fundamentos, opone una resistencia larga, larga, cual terca acémila, hasta que, obligado por golpes e improperios, mete el pie en ese charco.

Pero, por otra parte son tantas las citas en sus escritos privados en los que hace referencia habitual a la interpretación astro-

lógica de la posición de los astros, reconociendo su influencia en su propia vida, que difícilmente puede entenderse que Kepler era incrédulo en cuestiones astrales.

De todas formas, hay que decir que se planteó la astrología con ojos nuevos e investigadores y que se burlaba de los calendaristas que, en busca de la fama, aprovechaban «las supersticiones de las mentes necias». No convenía «a los hombres serios ni a los filósofos arriesgar la fama de su talento y su prestigio con una materia que se ensucia cada año con tantas adivinaciones ridículas y hueras». Pero esa consideración, claramente negativa de la astrología, la compatibilizaba con el firme convencimiento de que había que buscar la verdad sobre las relaciones del zodíaco, la posición de los astros especialmente en el nacimiento, y el destino o las inclinaciones humanas. De todas formas, proseguía:

> Buena parte de los principios de esta arte árabe viene a traducirse en nada, no es nada todo lo que forma parte de los secretos de la naturaleza y, por tanto, no debe desecharse junto a naderías. Debemos, más bien, apartar las piedras preciosas del estiércol, debemos honrar la gloria de Dios tomando como finalidad la contemplación de la naturaleza.

Cuando se casó, según nos cuenta, los astros anunciaban «un matrimonio más apacible que feliz». En el nacimiento de su esposa «los astros Júpiter y Venus no ocupaban una posición favorable». Y cuando nació su primer hijo volvió a consultar las estrellas, que le auguraron lo mejor sobre las cualidades futuras del bebé, aunque, en este caso, su naturaleza débil no correspondió a la llamada de los astros: murió al poco tiempo. Y bien es sabido que Kepler escribió su propio horóscopo para alcanzar mejores conclusiones experimentando con su propio cuerpo. Para ello, dio tal cantidad de datos sobre su infancia y juventud que, actualmente, este autohoróscopo facilita en gran medida la labor del biógrafo.

Cuando el hombre nace quedan grabadas en su alma la constelación natal y la posición de las estrellas errantes, lo que determina la carta astral. Pero los astros determinan una tendencia, no determinan estrictamente un destino:

> Mis astros no fueron un Mercurio matutino en el ángulo de la séptima casa en cuadratura con Marte, sino Copérnico y Tycho Brahe, sin cuyos diarios observacionales continuaría enterrado en tinieblas todo lo que he sacado a plena luz hasta el día de hoy; Saturno no fue el soberano de Mercurio, sino los excelsos emperadores Rodolfo y Matías, mis soberanos; el Capricornio de Saturno no fue la morada de los planetas, sino la alta Austria, la casa del emperador [...]. El único efecto de mi constelación natal es que ha despabilado la llamita de mi talento innato y del discernimiento, ha instado a mi espíritu a trabajar con constancia y ha acrecentado mis ansias de saber.

¿Acertaba o no acertaba? La historia de las predicciones acientíficas es siempre engañosa porque olvida los desaciertos y propala los aciertos y el mensaje ambiguo ha de granjearse la connivencia del receptor para que aporte la otra mitad. En cierta ocasión se produjo una violenta tormenta que oscureció el cielo, conforme a una predicción suya, de tal forma que salió la gente a la calle prorrumpiendo el nombre de Kepler. En cambio, sus predicciones meteorológicas para 1604 fueron tan desatinadas que algunas personas juiciosas le aconsejaron que abandonase su trabajo como calendarista. Sus mecenas le instaban a que concretase, que no se limitara, por ejemplo, a predecir una próxima batalla —eso era fácil de predecir—, sino quién sería el vencedor.

PRIMER MATRIMONIO Y PROBLEMAS RELIGIOSOS

Por recomendación de sus amigos, Kepler decidió casarse con la joven Barbara Müller, natural de un pueblo cerca de Graz. Pese a tener tan solo veintitrés años, ese era ya su tercer matrimonio, tras enviudar dos veces. De su primer marido, aportaría a la casa familiar a su hija Regina, personaje importante en la vida de Kepler por el gran cariño que siempre le tuvo.

Como se ha dicho, Kepler era luterano y estaba en Graz en una escuela evangelista (sinónimo prácticamente de «protestante», de «luterano» y de acogerse a la confesión de Augsburgo),

pero vivía en una región muy próxima a las regiones en las que dominaba el catolicismo, el papismo, los jesuitas, la Contrarreforma. Kepler no eludía los debates religiosos aunque siempre con mucho respeto a quien defendía creencias ajenas, a lo que él siempre respondía *sancta sancte* (con santidad sobre lo santo).

Los católicos se adentraban en Estiria, la región de Graz, cada vez con más fuerza. Se hicieron finalmente con el poder en Graz. Primero se inhabilitó a los predicadores evangélicos para otorgar los sacramentos y la bendición nupcial. Y lo que más afectó a Kepler, se exigió a los predicadores de la escuela evangelista donde él trabajaba que abandonaran Graz en el plazo de ocho días. Y eso tuvieron que hacer todos los profesores, incluido Kepler. Pero, por alguna razón no bien conocida, se hizo una excepción con él, autorizándole a regresar. ¿A qué se debió esta gracia especial para con el joven profesor de Matemáticas? Quizá a su simpatía natural y sus enciclopédicos conocimientos, así como a que su neutralidad en el trato despertaba la benevolencia de los jesuitas; también la del canciller Von Hohenburg, quien tenía algunas dudas científicas que quería consultarle. Se buscó la excusa de que el profesor de Matemáticas debía ser expulsado como todos los demás profesores, pero no el Matemático Territorial, título que, como sabemos, ostentaba Kepler. Lo cierto es que volvió, conservó su exiguo sueldo, aunque no su función didáctica ya que la escuela había sido clausurada. Se le aconsejó que estudiara medicina y a punto estuvo de irse a Italia con tal fin. Esto ocurría en 1597.

Pero en 1600 el recrudecimiento de la implantación de la Contrarreforma se agravó. Se le dijo que si no aceptaba la doctrina católica sería expulsado de Graz. Aunque sus creencias no se amoldaban estrictamente a la ortodoxia luterana, se negó a abjurar de su credo y fue definitivamente expulsado.

CAPÍTULO 2

El astrónomo

La astronomía tiene dos bases: la observación y la teoría. Quiso la necesidad, más que el azar, que se encontraran el mejor observador y el mejor matemático: Brahe y Kepler. Entre ambos había una atracción científica y una no menos intensa repulsión de caracteres. Venció la primera y el resultado fue grandioso: las tres leyes de Kepler del movimiento de los planetas, la entrada a la teoría de la gravitación de Newton. Tycho ordenó a Kepler que dejara a la Tierra en el centro del mundo. El copernicano Kepler no le obedeció y puso en su lugar el Sol.

La relación entre Tycho Brahe (1546-1601) y Kepler fue decisiva en el desarrollo de la astronomía. Un gran observador que precisaba un gran matemático y un gran matemático que precisaba un gran observador. Tal encuentro se produjo en Praga, pero no era Bohemia patria ni del uno ni del otro. Ambos acabaron allí expulsados de sus países. En efecto, Tycho Brahe había sido expulsado de su isla observatorio de Hven, en Dinamarca, entre otras cosas por no haber recibido ni un solo sacramento en dieciocho años, aunque su despilfarro, su despotismo con lugareños y sirvientes y la muerte del monarca protector, fueron motivos más determinantes de la expulsión. Tras algunas vicisitudes intermedias y varios cambios de país de residencia, había sido nombrado Matemático Imperial en Praga por el emperador Rodolfo II, gran aficionado a la astrología y a la astronomía. Por su parte, Kepler había sido desterrado de Graz por la intolerancia contrarreformista.

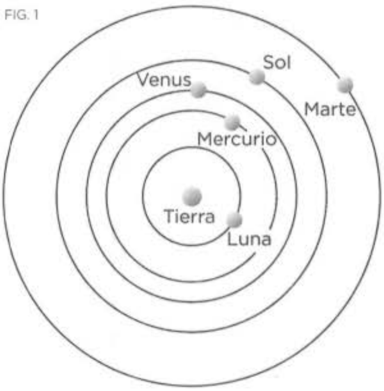
Pero antes de esta expulsión, Tycho había invitado a Kepler a una estancia en el castillo de Benatek, localidad cercana a Praga, donde estaba construyendo un segundo observatorio como el de Uraniborg, el mítico observatorio que había creado en Dinamarca. Contaba con la ayuda, incondicional pero inconstante, del entusiasmado e insensato emperador. Esta invitación se debía a que Kepler había enviado su obra *Mysterium cosmo-*

graphicum a los más ilustres astrónomos de la época, entre los cuales no podían faltar Galileo y Tycho Brahe, esperando sus comentarios y críticas. Brahe había hecho llegar a Kepler sus comentarios en los que expresaba su admiración y un tanto también su benevolencia. Kepler aceptó la invitación ansioso de conocer a tan ilustre astrónomo y los mejores datos que existían sobre los planetas. Tycho le esperaba deseoso de que aquel joven matemático pusiera orden y ajustara sus observaciones al modelo que él mismo había concebido. En ese modelo, Mercurio y Venus giraban en torno al Sol, y este y los otros planetas en torno a la Tierra, que seguía siendo el centro del mundo.

Pero ese tan deseado encuentro no pudo tener un principio más desastroso. La visita tuvo lugar en 1599, cuando Brahe

LOS TRES MODELOS DE UNIVERSO

FIG. 1

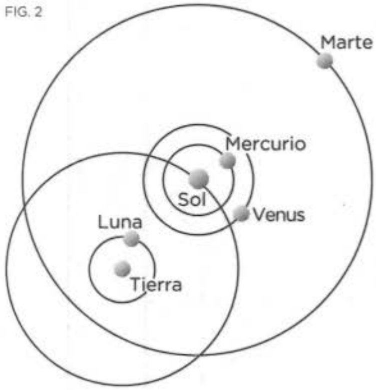


Modelo de Ptolomeo

En la figura 1 se representa el modelo heredado de la Antigüedad, el popularizado por Ptolomeo. Este denostado sistema es muy intuitivo y está basado en una impresión subconsciente de «democracia dinámica». Vemos multitud de objetos en nuestro entorno en reposo unos con respecto a otros y unos pocos astros que se mueven con respecto a ellos. Asociamos inconscientemente el reposo a la mayoría de los objetos y concluimos que la Tierra está en reposo. El sistema de Tycho Brahe se reproduce en la figura 2. Este modelo se considera como de transición y algo alambicado. En realidad tiene su justificación porque Mercurio y Venus no se separan nunca mucho del Sol. Finalmente, en la figura 3 se representa el sistema copernicano. En todos ellos se han omitido los epiciclos. Todavía habría más modelos no representados. El de Kepler sería como el de Copérnico

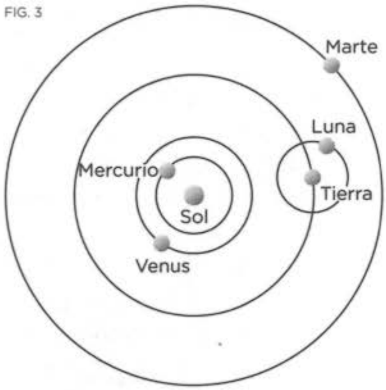
tenía cincuenta y tres años y Kepler solo veintiocho. Esta diferencia de edad no habría sido importante de no haber existido tanta diferencia de carácter entre ambos. Brahe era noble y siempre estaba rodeado de familiares y ayudantes. Era caprichoso, enérgico, autoritario y extravagante. En Hven no solo tenía instrumentos descomunales y multitud de servidores, sino también una colección de autómatas, ingenios mecánicos, su propia imprenta y un alce borracho. Una nariz de oro en sustitución de la suya, pues la había perdido en un duelo, así como muchas otras peculiaridades, hacían de él un personaje mítico. Encerraba en la mazmorra a sus ayudantes cuando se equivocaban en los cálculos y, aunque nunca pensó hacer tal cosa con Kepler, sí que lo consideró inicialmente más un ayudante a su

FIG. 2



Modelo de Tycho Brahe

FIG. 3



Modelo de Copérnico

pero con las órbitas elípticas, y podríamos hablar de un modelo de Le Verrier-Einstein en el que las órbitas no son cerradas por existir un «avance del perihelio» que comentaremos más adelante.

servicio que un colaborador de tú a tú. Kepler tenía que aguantar los insultos, bromas, destemplanzas y excesos etílicos de su autoritario anfitrión, hiriendo su orgullo y su paciencia. Sin embargo, hay que decir también que Brahe tenía un lado bonachón y comprensivo.

Por el contrario, Kepler provenía de una familia de inferior estofa, como sabemos, con una tía medio bruja y un padre pendenciero que escapó de la horca. Estaba acostumbrado a recibir un salario exiguo, pero también a trabajar con independencia en los temas a los que su intuición y su capricho le llevaban. En Praga estaba a las órdenes de Brahe. Además tenía que soportar la envidia de sus ayudantes, celosos porque su «amo» hubiera cedido al nuevo astrónomo los temas encomendados a ellos anteriormente. Y también debía soportar a los muchos hijos de Brahe que no cesaron de entorpecerle y asediarlo a lo largo de toda su vida.

Pronto se desató la ira entre ambos astrónomos. Kepler dijo que se volvía a Graz. Brahe intentó contenerlo. Desde Graz, Johannes escribió una durísima epístola, a la que sucedió otra de arrepentimiento. Kepler fue criticado porque no había sabido apreciar la magnanimidad de Brahe, lo que le disgustó aún más, pues él no quería ninguna generosidad, sino un salario y un trato correspondientes a su trabajo y su valía. Tras la tormenta vino la calma y Kepler volvió a Praga al cabo de tres semanas, donde la necesidad mutua forzó el entendimiento entre ambos sabios.

La futura colaboración había de concretarse así: Kepler debería procurar seguir cobrando su sueldo de Matemático Territorial de los estados estirios como cuando estaba en Graz. A ese salario de 200 florines, Brahe procuraría conseguir del emperador otros 100 florines de sobresueldo. Compárese esto con los 3000 florines que él mismo tenía asignados. Además Brahe se comprometía a conseguir de Rodolfo II un permiso para que Kepler pudiera trabajar en Bohemia durante dos años.

Fue entonces cuando arreció la intolerancia papista en Graz, tras la cual, Kepler fue exiliado al no querer renegar de su fe. Prefirió el exilio a la infidelidad a la confesión de Augsburgo. La





FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Grabado que muestra a Tycho Brahe, de pie, conversando con Johannes Kepler. Al fondo, retrato de Copérnico.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Ilustración de una de las obras de Brahe, *Historia coelestis* (1666), en la que aparece Uraniborg, el espectacular observatorio que el rey de Dinamarca puso a su disposición en la isla de Hven.

FOTO INFERIOR:
Planisferio incluido en las *Tablas rudolfinas*, obra que contiene los valiosos datos astronómicos recopilados por Tycho Brahe, publicada por Kepler en 1627.



lealtad de Kepler a sus principios siempre fue incondicional, eso a pesar de que defendía una reconciliación de católicos, protestantes y calvinistas, y eso, a pesar de que era considerado como heterodoxo dentro del credo luterano. En cuanto a la compatibilidad de su ciencia con los defensores de uno y otro bando, poco hay que decir, puesto que tanto el papa como Lutero consideraban impío el copernicanismo. Pero no fue esta la razón de su expulsión.

Así, Kepler fue expulsado de Graz. Esta no era su patria pero sí la de su mujer, heredera de una pequeña fortuna y un buen nombre, y donde él ya contaba con numerosas amistades y admiradores. Kepler quedó en la calle. ¿Adónde ir? No estaba claro que pudiera volver a Praga, puesto que las condiciones establecidas eran que él trabajaría en la ciudad conservando su salario de Graz, pero este era un salario que ya había perdido. Además, no estaba seguro de poder someterse nuevamente a la autoridad del danés.

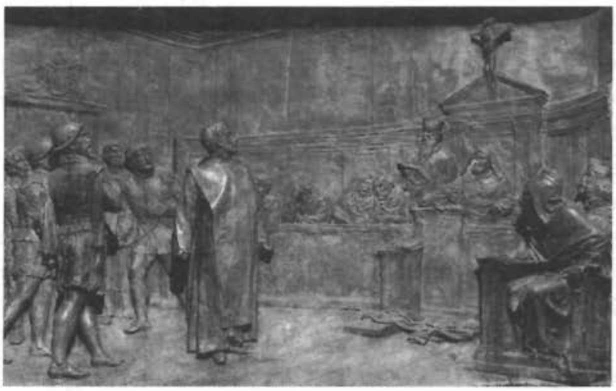
Pero Brahe le tendió una mano generosa: le pidió que volviera a Praga y él se encargaría de que cobrara un salario suficiente. Kepler procuró la ayuda de Mästlin para trabajar en la Universidad de Tubinga o en otra universidad alemana. También Linz era otra posibilidad, cerca de la ciudad de su esposa. Sin esperar a recibir la respuesta a todas sus peticiones, emprendió su viaje a Praga.

Empezó a recorrer el meridiano que había de ser la línea en la que Kepler desarrollaría su trabajo a lo largo de su vida, el meridiano que pasaba, con cierta holgura, por Graz, Linz, Praga y Zagan, de una ciudad a otra zarandeado por las severas imposiciones religiosas. De Linz no tuvo respuesta. De Mästlin sí, pero tardía y negativa, cuando estaba ya en Praga. Mästlin no había encontrado nada para él.

Brahe y Kepler emprendieron entonces una felicísima colaboración. Esta vez se entendieron y se respetaron, incluso intimaron. A la generosidad de Brahe respondió Kepler con una gratitud, una admiración y un reconocimiento que mantuvo toda su vida. Brahe sentía próxima su muerte y sabía que solo a Kepler podía encomendar la finalización de la obra de toda su vida: unas tablas con una precisión sin precedentes en la historia que habrían de

UN NUEVO MODELO: GIORDANO BRUNO

El sistema geocéntrico ptolemaico fue superado por el copernicano, heliocéntrico. Cuando se hace esta afirmación se minimiza el hecho de que el sistema de Copérnico distaba de ser correcto, pues suponía que el Sol era el centro del universo. Kepler introdujo mejoras al modelo, pero seguía con esta suposición tan enfrentada con la cosmología actual. Podríamos suponer que desplazar la Tierra de su lugar central era un paso en la dirección correcta y que más adelante se darían pasos sucesivos encaminados a desplazar el Sol también del centro del universo. Todavía no se podía pensar de otra manera. Pero en realidad ya vimos que Nicolás de Cusa suponía que el Sol no era el centro. Contemporáneo suyo, y de Kepler y Galileo, fue el italiano Giordano Bruno, que defendía un sistema cosmológico mucho más conforme con la concepción actual: no solo decía que el Sol no era el centro, sino que muchas de las llamadas estrellas fijas podían ser soles como el nuestro y podían contener planetas como la Tierra y los otros astros del sistema solar. El universo no era el sistema solar más unas estrellas fijas de interés secundario; el universo de Bruno era el universo de las estrellas fijas, que no eran tal, y el sistema solar, uno más de los infinitos que había. Somos conscientes de él porque vivimos en él, pero pueden existir infinidad de mundos habitados. Así pues, esos pasos correctos que habría que esperar tras la revolución copernicana ya estaban dados por Bruno en el siglo XVI. No solo se trataba de la disyuntiva de geocentrismo o heliocentrismo, sino que había una tercera posibilidad más interesante: ninguna de las dos, ni la Tierra ni el Sol eran el centro. El universo de Bruno está mucho más próximo a su concepción actual. Sin embargo, es más famoso por su trágico final: fue quemado vivo, junto con sus ideas, en la hoguera de la Inquisición romana, en 1600.



Bajorrelieve en bronce obra del escultor italiano Ettore Ferrari que ilustra a Giordano Bruno ante el tribunal de la Inquisición. Forma parte de la estatua erigida a Bruno en la Piazza Campo dei Fiori de Roma, el mismo lugar en el que fue ajusticiado en la hoguera.

llevar el nombre de *Tablas rudolfinas.* Brahe y Kepler fueron a ver al emperador, quien les recibió entusiasmado. También Kepler cobraría su salario del Imperio y así comenzó la época más científicamente interesante de nuestro ilustre astrónomo. En Praga se instaló también su familia, además de Regina, la hija de Barbara en su anterior matrimonio, por quien sentía un gran amor paternal.

Tuvo Kepler que volver provisionalmente a Graz por la herencia de su suegro. Allí fue bien recibido por todos, a pesar de haber sido expulsado, aunque parece que no tuvo mucha suerte con la herencia, pues comentó en una de sus cartas que el viaje había sido inútil. Volvió a Praga con su esposa, su hija adoptiva, su amigo Brahe y sus medidas de Marte.

Cierto que tenía que someterse a la disciplina de Brahe especialmente estricta en lo que se refería a los datos, su auténtico tesoro. Kepler podía verlos y trabajar con ellos pero de ningún modo moverlos de su sitio y menos copiarlos y dedicarlos a otro fin que el de respaldar su modelo de universo, intermedio entre el ptolemaico y el copernicano, en el que Kepler no creía.

Pero Tycho Brahe murió al poco tiempo, el 24 de octubre de 1601, de una afección en la vejiga. Kepler sintió profundamente su muerte y hasta le compuso una hermosa elegía que acompañó al cadáver a Dinamarca. Pero, seguramente, Kepler habría de quedar nuevamente en la calle. No fue así. El emperador le nombró sucesor de Brahe, es decir, Matemático Imperial, quedando a su disposición todos los instrumentos y todos los datos de su antecesor y respetado amigo, con la única obligación de completar las *Tablas rudolfinas*, tal como hubiera querido el genial astrónomo de entrañas tan auríferas como sus narizotas.

Kepler fue así nombrado Matemático Imperial y pasó a ser el dueño absoluto de aquel tesoro que tanto había codiciado, el gran fruto de las observaciones de toda la vida del astrónomo más preciso de la historia. Su salario quedó fijado por el mismo emperador en 500 florines anuales, mucho menos que lo que cobraba Brahe, pero mucho más que lo que había cobrado Kepler en toda su vida. Sin embargo, los pagos se retrasaban y a veces indefinidamente.

LA MUERTE DE TYCHO BRAHE



La muerte de Tycho Brahe está envuelta en la leyenda y el misterio. La idea más común es que murió por aguantarse las ganas de orinar en un banquete real. Esto pudo provocarle una cistitis de la que murió en una agonía dolorosa de once días. El protocolo lo mató. Últimamente se ha difundido la hipótesis de que murió envenenado, porque se ha encontrado una gran cantidad de mercurio en su cabello. Y al buscar sospechosos se ha pensado en Kepler. Se dice que este envenenó a su maestro para quedarse con sus datos. Realmente Kepler no fue discípulo de Tycho, sino más bien su distinguido colaborador, por muy tirano y despótico que fuera Tycho y por mucho que este cediera con cuentagotas el acceso a la gran fortuna que eran sus datos. Conociendo la vida, el carácter, la integridad y la obra de Kepler, esta hipótesis es «descabellada».

Un hombre agradecido

Kepler era muy honrado. Aunque las desavenencias con Tycho fueron graves, sobre todo en su primera y corta visita a Praga, posteriormente Kepler estuvo profundamente agradecido a Tycho, el único que le ayudó cuando fue expulsado de Graz, y toda su vida reconoció su obra, su mérito y su bonhomía. Pasó gran parte de su vida completando la obra del gran y extravagante hombre, para que su trabajo no hubiera sido en vano, hasta completar y publicar las *Tablas rudolfinas*, magnífico punto final de la obra de Brahe. El propio emperador Rodolfo II encomendó a Kepler esta labor, ofreciéndole a cambio los datos de Tycho, sus instrumentos de medición, los más perfectos instrumentos pretelescópicos y nombrándole su sucesor como Matemático Imperial. Y Kepler terminó las tablas como un deber sagrado en reconocimiento a su admirado colega. La hipótesis de que Kepler envenenó a Tycho no cuadra con la historia.

Fue sin ninguna duda el período más productivo de la vida de Kepler, como astrónomo y como astrofísico. Es hora de que nos preocupemos de esa magnífica contribución suya a la ciencia consagrada.

LAS TRES LEYES DE KEPLER

Recordemos estas leyes tal como se suelen enunciar actualmente, y veamos después cómo se obtuvieron y cuándo y dónde se publicaron. Las tres famosas leyes de Kepler se enuncian así:

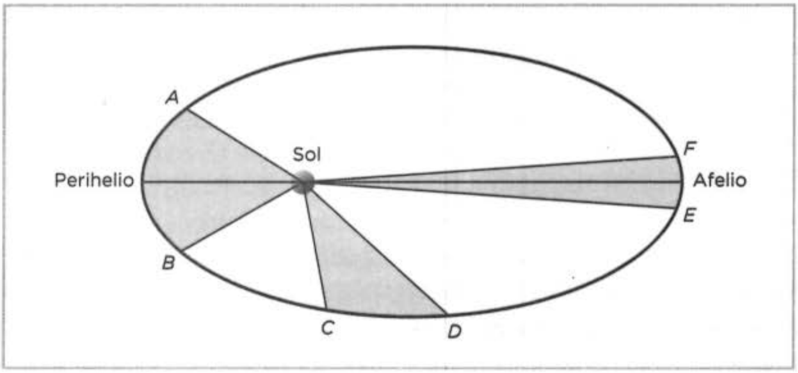
— Primera: Las órbitas de los planetas son elipses, estando el Sol situado en uno de sus focos.

— Segunda: Igualdad de las velocidades areolares; el segmento que une un planeta con el Sol, barre áreas iguales en tiempos iguales.

— Tercera: Los cuadrados de los períodos orbitales de los planetas son proporcionales al cubo de sus distancias medias al Sol.

Las dos primeras quedan explicadas en la figura. Una elipse es el lugar geométrico de todos los puntos de un plano tales que la suma de las distancias a dos puntos fijos es constante. A estos puntos fijos se les llama *focos*, de hecho, tal denominación fue dada por el mismo Kepler.

Esta definición sirve para trazar una elipse por el método llamado del *jardinero*, probablemente debido a James Clerk Maxwell o reinventado por él: se atan los dos cabos de una cuerda a dos



Las áreas Sol-*A*-*B*, Sol-*C*-*D* y Sol-*E*-*F*, recorridas en tiempos iguales, son iguales. El eje mayor es la línea de los ápsides, que va desde el perihelio (punto de la órbita más cercano al Sol) al afelio (punto más alejado).

clavos hincados en los focos; con otro clavo se mantiene tensa la cuerda, al tiempo que se hace deslizar el clavo por el suelo; este tercer clavo describe una elipse. En la película *Ágora*, su director, Alejandro Amenábar, atribuía su invención apócrifa a la astrónoma Hipatia.

A la máxima distancia desde el centro de la elipse hasta la elipse se le llama a, *semieje mayor*. A la distancia mínima desde el centro hasta la elipse se le llama b, *semieje menor*. La excentricidad, e, de la órbita se define mediante:

$$b = a\left(1 - e^2\right)^{1/2}.$$

Cuando la excentricidad e es cero, $b = a$, la elipse es una circunferencia, y los dos focos coinciden en el centro de la misma. Cuando se aproxima mucho a la unidad, la elipse es muy alargada, degenerando en un segmento cuando la excentricidad llega a la unidad, su máximo valor.

La segunda ley implica que cuando el planeta se encuentra más cerca del *perihelio* se mueve más deprisa que cuando está cerca del *afelio*. El perihelio es el punto de la órbita más cercano al Sol y el afelio el más alejado. Así pues, la órbita no se recorre con velocidad constante, exceptuando el caso extremo de que la elipse sea una circunferencia. En el caso de una órbita circular no cabe hablar ni de afelio ni de perihelio, evidentemente.

La tercera ley de Kepler también se obtiene de una forma fácil de recordar, para el caso particular de una órbita circular, con excentricidad nula. En ese caso la fuerza de gravitación que actúa sobre el planeta es igual a su masa por la aceleración centrípeta (V^2/d):

$$\frac{GMm}{d^2} = m\frac{V^2}{d},$$

donde G es la constante de gravitación universal y M la masa del Sol. Ahora d es la distancia del planeta al Sol y V su velocidad en el movimiento de traslación. Como G y M son constantes independientemente del planeta que estemos considerando:

$$V^2 d = \text{constante}. \quad [1]$$

Teniendo en cuenta la fórmula que relaciona la velocidad lineal, V, con la velocidad angular, Ω,

$$V = \Omega\, d, \quad [2]$$

y que el período de revolución T está relacionado con la velocidad angular mediante:

$$\Omega = \frac{2\pi}{T}. \quad [3]$$

Sustituyendo [3] en [2] y, luego, [2] en [1], obtenemos:

$$\frac{d^3}{T^2} = \text{constante}. \quad [4]$$

Es decir, el cubo de las distancias medias de los planetas es proporcional al cuadrado del período de revolución.

¿Cómo no se le ocurrió a Kepler hacerlo así, acabando en media página lo que a él le llevó libro y medio? Pues porque para obtener la tercera ley de Kepler hemos utilizado la ley de gravitación de Newton que, evidentemente, no se conocía. Es más, el proceso fue realmente el inverso: tras conocer las leyes de Kepler, Newton propuso la ley de gravitación universal para que se cumplieran dichas leyes. Esta deducción es solo una forma de recordar la tercera ley de Kepler, y además únicamente es válida para la órbita circular.

A continuación se expone una tabla con las distancias de los planetas al Sol. En la primera columna se encuentran los nombres de los planetas. En la segunda se dan sus distancias al Sol en millones de kilómetros. En la tercera, lo mismo pero empleando como unidad la distancia Tierra-Sol, lo que se denomina *unidad astronómica* (UA). En la cuarta, lo mismo, pero con números muy aproximados y sencillos de recordar. Y en la quinta, lo mismo, pero indicando el tiempo que tarda la luz en recorrer estas distancias.

Planeta	En millones de km	En unidades astronómicas (UA)	En UA aproximadas	Tiempo que tarda la luz en recorrer la distancia
Mercurio	58	0,387	1/3	3 min
Venus	108	0,723	3/4	6 min
Tierra	150	1	1	8 min
Marte	228	1,524	3/2	13 min
Júpiter	778	5,203	5	45 min
Saturno	1427	9,539	10	1 h 20 min
Urano	2870	19,18	20	2 h 40 min
Neptuno	4497	30,06	30	4 h

En [4] veíamos la tercera ley de Kepler escrita de forma que las distancias al cubo eran proporcionales al cuadrado de los períodos. Pero ¿cuál es la constante de proporcionalidad? Vemos que tal constante depende de G y de la masa del Sol. Pero imaginemos que en un momento dado no recordamos esas constantes y que queremos utilizar la tercera ley de Kepler para conocer los períodos de los planetas, aunque sea de forma aproximada, empleando las distancias aproximadas de la tabla anterior. Todo resulta muy sencillo si medimos las distancias en unidades astronómicas (UA), es decir, tomando la distancia Sol-Tierra como unidad, y medimos los períodos de traslación en unidades de años terrestres. Entonces, como la Tierra es un planeta más, podemos reescribir con estas unidades la fórmula anterior como: $T = d^{3/2}$, es decir, si queremos conocer el período (sidéreo) de un planeta no tenemos más que elevar al cubo la distancia y extraer la raíz cuadrada. Utilicemos Venus como ejemplo. Tomamos su distancia como 3/4 UA, según el valor aproximado de la tabla anterior. Su período de traslación será de 0,65 años terrestres. Para Marte, tomando como distancia aproximada 3/2 UA y haciendo las operaciones de la fórmula anterior, obtenemos 1,8 años terrestres. Y para Júpiter, con $d = 5$ UA, obtenemos que un año joviano es igual a unos 11 años terrestres. Naturalmente, todos estos cálculos se pueden hacer

con toda precisión. La tercera ley de Kepler, como las otras dos, es extraordinariamente precisa.

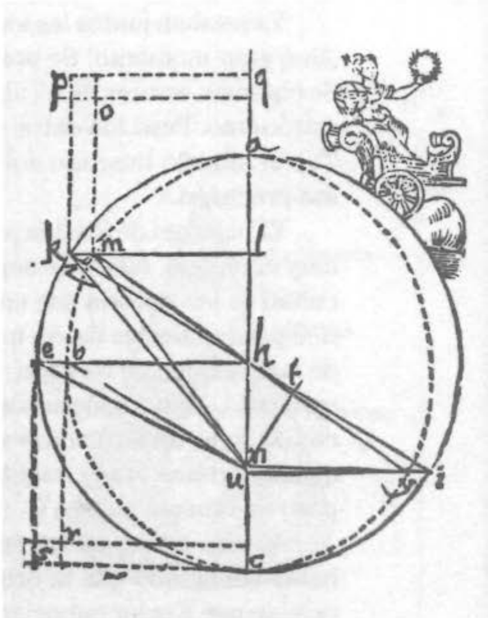
«ASTRONOMIA NOVA»

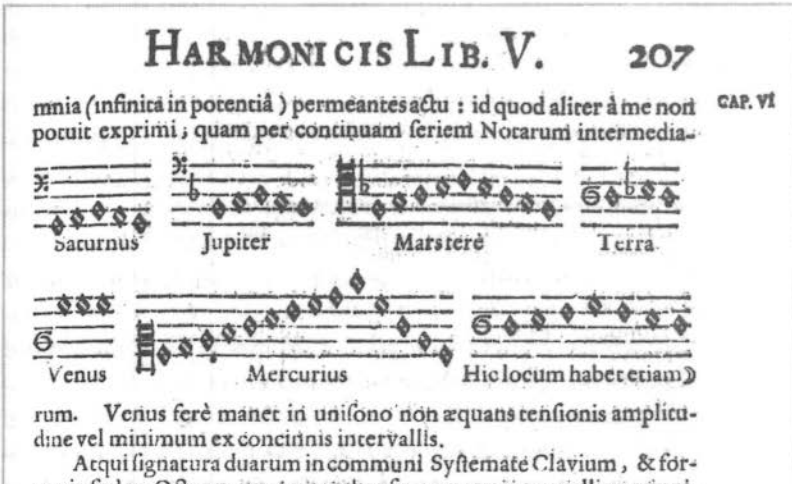
Se puede decir que este es el libro de Kepler más significativo, el primer libro moderno de astronomía. En él se obtienen las dos primeras de las tres leyes que llevan su nombre, aunque curiosamente, la segunda precede a la primera. La tercera, como hemos visto, apareció en *Harmonice mundi*, un libro posterior. *Astronomia nova* estaba prácticamente escrito en 1605 aunque por problemas relacionados con los herederos de Tycho no fue impreso hasta 1609. Su título completo era: *Astronomia nova seu physica coelestis, tradita commentariis de motibus stellae Martis (Astronomía nueva o física celeste, deducida de los registros del movimiento de la estrella Marte).*

Se destaca el planeta Marte en el título, aunque el contenido y las dos primeras leyes se aplican a todos los planetas. La razón es que Brahe, en la primera entrevista con Kepler, le encomendó el problema de la órbita de Marte, quizá para humillarlo porque dicho planeta daba las medidas más complejas y de más difícil interpretación. Fue una suerte que Kepler tuviera este primer cometido, porque al tener Marte una gran excentricidad, era el más apropiado para conseguir una descripción que ajustara bien los datos.

Para llegar a la formulación de las dos primeras leyes, Kepler tuvo que recurrir a métodos ingeniosos y matemáticamente complejos que resolvió incluso con procedimientos precursores del cálculo diferencial. También recurrió a hipótesis novedosas. Aunque, como siempre, mezclaba especulaciones seudorreligiosas con un extremado respeto a los datos, en este caso el que predominó fue precisamente ese respeto. El libro es todo un ejemplo de rigor e investigación objetiva. Es fruto del tesón, la imaginación, la exactitud y la habilidad matemática. También es muy difícil de leer, puesto que Kepler desarrollaba todos los intentos fallidos previos con la misma minuciosidad que los correctos finales.







HARMONICIS LIB. V. 207

mnia (infinitâ in potentiâ) permeantes actu : id quod aliter à me non potuit exprimi ; quam per continuam seriem Notarum intermedia- CAP. VI

rum. Venus ferè manet in unisono non æquans tensionis amplitudine vel minimum ex concinnis intervallis.

Atqui signatura duarum in communi Systemate Clavium, & formatio sceleti Octavæ, per comprehensionem certi intervalli concinni, est rudimentum quoddam distinctionis Tonorum seu Modorum: sunt ergò Modi Musici inter Planetas dispertiti. Scio equidem, ad formationem & definitionem distinctorum Modorum requiri plura, quæ cantus humani, quippe intervallati, sunt propria: itaque voce quodammodò sum usus.

FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Johannes Kepler, en un retrato de 1610 de autor desconocido.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Página de *Astronomia nova* (1609) que muestra los trabajos de Kepler para establecer la órbita de Marte. Esta obra contiene las dos primeras leyes del astrónomo alemán.

FOTO INFERIOR:
Página de *Harmonice mundi* (1618) con la música que Kepler atribuía a los astros, siguiendo la tradición pitagórica.

Ya estaban juntos las ideas de Copérnico y los datos de Tycho. ¡Qué gran momento! Se prometía una tarea fácil. Pero no lo era. Se obtenían errores de 8', algo que habría bastado a cualquier otro astrónomo. Pero los datos de Tycho tenían errores de menos de 2' y el modelo buscado solo sería admisible si podía ajustarse a esa precisión.

El hallazgo de las dos primeras leyes de Kepler es un proceso muy complejo, difícil de seguir en todos sus pormenores. La dificultad es tan notoria que en la actualidad sería una tarea muy difícil para cualquier físico, incluso partiendo de los conocimientos de la mecánica de Newton, e incluso conociendo cuál debe ser el resultado. Algunas ideas básicas fueron decisivas y fueron proporcionando un ajuste cada vez mejor. En primer lugar, Kepler pensó que las órbitas eran ovaladas, sin llegar a precisar en un primer paso que fueran elipses.

Mucho antes, el astrónomo andalusí Azarquiel (1029-1087) había concebido que la órbita de Mercurio era ovalada. Es muy posible que Kepler conociera este trabajo, dado que Azarquiel era muy citado y traducido y porque Kepler estudiaba concienzudamente a los astrónomos de otras épocas. O es posible que no, porque, de hecho, nunca lo citó.

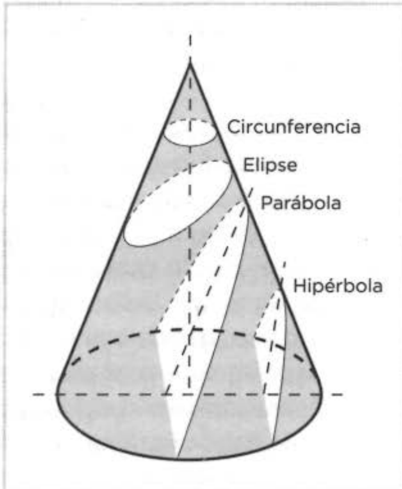
También consideró que el Sol no tenía por qué estar en el centro de las órbitas; es más, de hecho era difícil que estuviera en el centro de todas ellas. Esto no era nuevo, era la antigua idea de las «ecuantes», ya utilizadas en el sistema geocéntrico. En efecto, si el Sol no ocupaba el centro de una órbita circular recorrida con velocidad uniforme, observaríamos una velocidad variable desde la Tierra.

Otra idea feliz consistió en considerar que la Tierra tenía que comportarse como un planeta más, estando el centro de su órbita también desplazado con respecto al Sol. Anteriormente, la coincidencia supuesta de ambos puntos equivalía a trabajar con el «Sol medio», pero había que tener en cuenta el «Sol verdadero». Esto conducía a un mejor ajuste.

Había, entonces, para cada planeta, incluida la Tierra, una línea de los «ápsides», que conectaba un «afelio» y un «perihelio». Se obtenía que la razón de las velocidades en el afelio y en

LAS CÓNICAS

La elipse, y su caso particular la circunferencia, de excentricidad nula, son curvas de las llamadas *cónicas*, aquellas que se obtienen cuando un plano corta un cono. Dependiendo de la orientación del plano con respecto al cono, las figuras resultantes son la elipse, la hipérbola y la parábola. Estos nombres fueron dados por Apolonio de Pérgamo (262 a.C.-190 a.C.), primer autor conocido que estudió las cónicas. Hemos visto que las órbitas de los planetas son elipses, pero también las otras cónicas pueden representar órbitas que obedecen a la gravitación creada por una masa puntual. Cuando un objeto viene de una gran distancia a gran velocidad, su trayectoria se curva debido a la gravitación, pero en la mayoría de los casos el objeto no queda atrapado y se aleja hacia el infinito. En ese caso, el objeto sigue una trayectoria hiperbólica. Los cometas de largo período tienen una excentricidad tan alta que su trayectoria es casi parabólica, transición entre la elíptica y la hiperbólica. En el caso de las trayectorias hiperbólicas abiertas, el objeto y la masa puntual no forman un sistema binario propiamente dicho. En una galaxia, las estrellas son tan pequeñas en comparación con la distancia interestelar típica (7×10^8 metros, frente a 10^{17} metros) que las «colisiones», o interacciones gravitatorias entre estrellas, son hipérbolas de muy escasa curvatura. Puede decirse que las colisiones son tan infrecuentes o tan débiles que no permiten alcanzar el equilibrio, como lo alcanzan las moléculas de aire de una habitación. Dos galaxias que se funden pueden conservar su identidad durante grandes períodos de tiempo, aunque ocupando un espacio común. También el número tan escaso de colisiones estrella-estrella ha debilitado la teoría de que el sistema solar haya podido surgir tras la colisión muy próxima de dos estrellas (hipótesis cataclísmica). Hoy se piensa que el Sol y los planetas son coetáneos, nacidos independientemente pero de la misma nube protosolar. Cuando se estudia la interacción gravitatoria entre dos estrellas hay que considerar que se trata de trayectorias cónicas, reservándose la elíptica para las estrellas binarias.



Las cónicas obtenidas por intersección de un plano con un cono.

el perihelio era la inversa de la razón de las distancias al Sol de estos puntos. En un primer paso, Kepler generalizó y supuso incorrectamente que esta propiedad era válida para todos los puntos de la órbita, es decir, que la velocidad era inversamente proporcional a la distancia al Sol. La verdad tenía que abrirse paso a trompicones.

Otra idea genial que ayudó a Kepler a conocer cómo era la órbita terrestre fue la de situarse mentalmente en Marte y, con una transformación adecuada de los datos, obtuvo una detallada descripción de nuestro propio movimiento.

Finalmente observó que la órbita oval más adecuada era la elipse, con lo cual obtuvo la expresión correcta de la primera de las leyes que llevan su nombre: «La órbita de un planeta es una elipse en uno de cuyos focos está el Sol». Probablemente, esta primera ley puso a prueba la pericia matemática de Johannes Kepler y es un resultado digno de toda admiración.

Otra de las ideas felices que le llevó a enunciar la segunda de sus leyes nos la cuenta él mismo:

> Puesto que era consciente de que existe un número infinito de puntos en la órbita y en consecuencia un número infinito de distancias, se me ocurrió la idea de que la suma de esas distancias se halla contenida en el área de la órbita. Recordé que Arquímedes había dividido también de la misma forma el área de un círculo en un número infinito de triángulos.

Vemos aquí la idea precursora del cálculo diferencial. La segunda ley, la de las velocidades areolares, es también de dificilísima obtención, incluso para un profesional actual. Su expresión es algo retorcida, pero es muy elegante y, lo que es más importante, precisa: «Áreas barridas en tiempos iguales, son iguales», independientemente de la posición de la órbita en la que se encuentre el planeta. Es una forma muy correcta para dar cuenta de cómo el planeta se va acelerando desde el afelio al perihelio y decelerando desde el perihelio al afelio. Su obtención supone también un mérito sensacional. No es una ley muy «práctica» si queremos saber en todo momento en qué punto de la órbita se encuentra el planeta en cada

instante de tiempo; hoy sería más práctico aplicar el principio de conservación del momento cinético.

PERÍODOS Y DISTANCIAS

Harmonice mundi, obra en la que Kepler expresó su tercera ley del movimiento planetario, tiene un carácter más medieval que *Astronomia nova*. Su inspiración tiene un componente místico-religioso importante: suponía que el Sol, representante del Padre, giraba sobre sí mismo. Más tarde se comprobó que esto era cierto mediante el movimiento de las manchas solares. Esta fuerza de giro emanaba del Sol, pero se iba debilitando con la distancia, de forma que los planetas más cercanos al Sol eran más intensamente arrastrados por su giro, por lo que se desplazaban más rápido en su órbita. La debilidad con que alcanzaba esta fuerza de giro a los planetas más alejados hacía que estos se movieran más despacio. Por tanto, debía existir una relación entre la distancia de un planeta y su período. Pero ¿cuál era esta relación?

Hay que decir que, fueran de la índole que fueran los caminos de inspiración de esta idea, no pudo ser más fecunda, porque fue precursora de la gravitación newtoniana, según analizaremos en el siguiente capítulo. Por otra parte, la ardiente mentalidad de Kepler no era incompatible, sino todo lo contrario, con su respeto escrupuloso de los datos. Dios había creado el hombre a su imagen y semejanza para que pudiera apreciar su divina geometría. Él, como hombre, podía y tenía que encontrar la relación exacta que buscaba, pero no inventársela. Y al encontrarla vivió una experiencia sublime porque la ley era sencilla y perfectamente exacta, como él esperaba del Creador: «El cuadrado de los períodos del movimiento de traslación de los planetas es proporcional al cubo de sus distancias medias».

Hoy, esta ley se hubiera obtenido como una ley de ajuste por procedimientos rutinarios y estándar, como pudiera hacerlo cualquier principiante investigador. En la figura 1, la distancia se representa en abscisas, y el período, en ordenadas. Vemos los cua-

FIG. 1

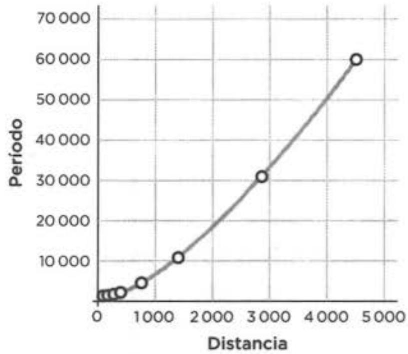
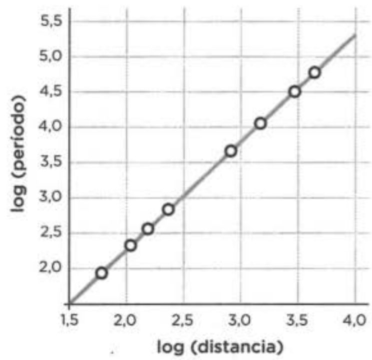


FIG. 2



tro primeros puntos, correspondientes a los planetas internos o rocosos (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), muy juntos. La figura 2 pone de manifiesto la relación buscada: en ella se representa el logaritmo del período frente al logaritmo de la distancia. La pendiente es justamente 3/2: el período es proporcional a la potencia 3/2 de la distancia. Los puntos representan los planetas, sin incluir a Plutón. Para obtener el período hay que multiplicar una constante de proporcionalidad por la raíz cuadrada del cubo de la distancia.

Podría pensarse que en aquellos admirables tiempos no se conocían las representaciones con abscisas y ordenadas y que tampoco se tenía conocimiento de los logaritmos. Pero no es así: las representaciones se conocían desde hacía más de un siglo, aunque entonces a las abscisas se las llamaba el «sujeto», y a las ordenadas, la «calidad». Con esa representación descubrió Domingo Soto (1494-1570) la ley de la caída de los graves. Se conocían asimismo los logaritmos, introducidos por John Napier (1550-1617), también conocido como Neper (de ahí logaritmos neperianos). Kepler no solo conocía la obra de Neper, sino que le dedicó uno de sus libros, y él mismo introdujo sus propios logaritmos, los logaritmos keplerianos. Sea como fuera, Kepler encontró esta importante fórmula que rige los movimientos planetarios y que se cumple con una precisión que pocas fórmulas de la física alcanzan.

«EPITOME ASTRONOMIAE COPERNICANAE»

Kepler publicó, estando ya en Linz, una obra monumental en ocho tomos en la que resumía su obra anterior, aportaba métodos nuevos para calcular la posición de un planeta, añadía argumentos nuevos y presentaba globalmente su concepción de la astronomía teórica. Este libro se tituló *Epitome astronomiae copernicanae*. Se publicó entre los años 1617 y 1621.

La denominación de «epítome» no parece muy apropiada para un libro con ocho tomos, aunque sean de formato pequeño. Tampoco parece indicado que se hable de «astronomía copernicana» cuando realmente se trataba de «astronomía kepleriana», pues Kepler había mejorado enorme y sustancialmente las ideas heliocentristas.

También parece un atrevimiento la publicación de un libro así con un título como ese, pues la controversia de Galileo con la Iglesia había ya alcanzado unas cotas muy altas de escándalo y repulsa eclesiástica. Además, en 1616 se había prohibido la obra de Copérnico, y el Santo Oficio también prohibió la primera parte del *Epitome*, la publicada en 1617. ¿De dónde pudo sacar Kepler la valentía para seguir con los tomos siguientes? Recordemos que no hacía mucho Bruno había sido quemado vivo.

Inicialmente, cuando el tomo del *Epitome* ya se había incluido en la lista de libros prohibidos, pensó incluso en abandonar Linz y buscar alguna nueva patria más tolerante. Probablemente le tranquilizó su amigo veneciano Vincenzo Bianchi. Este le dijo que no se preocupase, pues ¡los libros incluidos en el *Índice* acababan siendo los más leídos! Aunque fueran vendidos y comprados clandestinamente, despertaban mayor interés precisamente por su condición de proscritos.

El *Epitome* incluye astronomía esférica, argumentos a favor de la rotación de la Tierra que anteceden el principio de relatividad de Galileo, las leyes del movimiento planetario y otras cuestiones más de menor importancia. Está escrito en forma de catecismo, con preguntas y respuestas. Téngase en cuenta que el popular *catecismo* del padre Astete (1537-1601), que estuvo en las escuelas hasta mediados del siglo XX, ya se había publicado por

entonces, y se había extendido por el sur de Europa como paradigma de la Contrarreforma.

El *Epitome* es un libro muy característico de Kepler. Junto a sus formulaciones precisas, pioneras de la física moderna, como es el compendio de las magistrales leyes del movimiento planetario, vuelven a aparecer elucubraciones iluminadas ascéticas sobre distancias de órbitas y poliedros regulares y música de los planetas. Desde el punto de vista estilístico, el libro también es típico de Kepler: a la vez brillante y farragoso.

GALILEO Y KEPLER

La primera relación que tuvo Kepler con Galileo Galilei fue decepcionante. Cuando se publicó el *Mysterium cosmographicum*, Kepler envió un ejemplar a Galileo, esperando su contestación con sus críticas o sus elogios y, especialmente, como una forma de difusión de su descubrimiento de las distancias planetarias y los sólidos perfectos. Galileo contestó con una breve nota amable dejando la lectura para más adelante. Kepler le escribió nuevamente esperando su crítica, aunque tuviera que ser mordaz. Pero Galileo ya no contestó más. Quizá pensó que el método utilizado por Kepler era inadmisible.

Cuando Galileo publicó su famoso *Sidereus nuncius* en 1610, en el que exponía los brillantes descubrimientos con el telescopio, pidió al enviado toscano en Praga que llevara un ejemplar a Kepler, con el ruego de que emitiera un juicio. Kepler, más cortés que su colega italiano, le contestó casi a vuelta de correo, no ya con una breve carta sino con algo tan extenso que se convirtió en libro: *Dissertatio cum nuncio sidereo*. Estos dos libros pasaron a la historia juntos. Tienen ambos tanta carga científica que merecen un tratamiento aparte y por eso lo haremos en el próximo capítulo. Con el telescopio de Galileo los astros cobraban propiedades físicas, dejaban de ser meros puntos materiales o esferas perfectas. La astronomía, hija de la astrología, iba a tener a su vez una hija, la astrofísica. Bueno es que dejemos el análisis de la

nieta para el capítulo siguiente, donde nos encontraremos con el Kepler astrofísico.

Kepler y Galileo poseían mentalidades muy diferentes como para entenderse. Galileo, como Brahe, era excéptico en cuestiones de astrología; Kepler suponía un alma en los planetas. Galileo, al igual que Brahe, no mezclaba religión y ciencia, como sí lo hacía Kepler.

> «He pensado siempre que Kepler poseía un ingenio sutil y libre (aunque tal vez demasiado libre), siendo mi manera de pensar muy otra que la suya.»
>
> — Galileo Galilei.

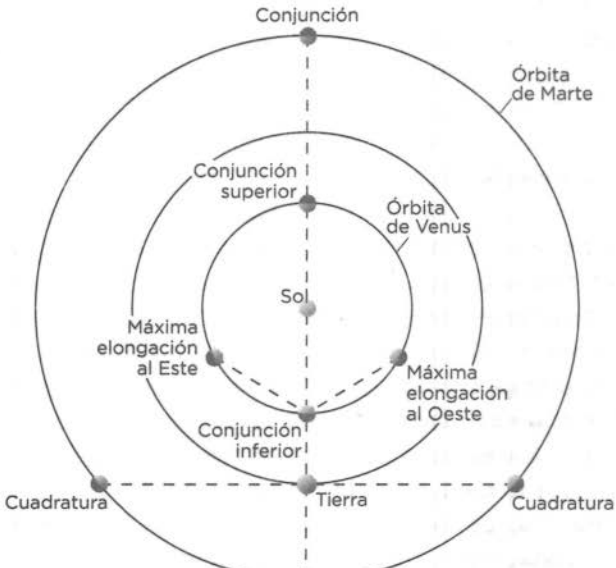
MENSAJES DE GALILEO A KEPLER

Son muy interesantes las misivas con las que Galileo daba a conocer provisionalmente sus descubrimientos a Kepler. La idea era comunicar el hallazgo con una frase breve, pero con las letras desordenadas formando otra frase. De esta forma difería la publicación del descubrimiento hasta estar más convencido y, por otra parte, dejaba constancia de él, aunque en forma encriptada. Kepler nunca hubiera hecho eso, pues tenía la idea de que sus descubrimientos servían más a la honra de Dios y al disfrute de los hombres que a su propia gloria. Pero, evidentemente, quería descifrar los mensajes en clave de Galileo; era consciente de su importancia, ya que describían lo que se observaba con un telescopio que aumentaba treinta veces los objetos y que recibía mucha más luz que la pupila humana, lo que permitía ver objetos no visibles al ojo desnudo, y mucho menos a sus pobres ojos políopes.

Cuando Galileo observó que Venus tenía fases, le escribió a Kepler: *«Haec inmatura a me jam frustra leguntur, o y»*, que podía traducirse por algo así como «Estas cosas sin madurar, que intentan comprender los demás inútilmente, hace tiempo que yo las leo, o y». Esta frase inmodesta era permutación de la que realmente quería decir: *«Cynthie figuras emulatur mater amorum»*,

LAS FASES DE VENUS

Mercurio y Venus, dos de los cuatro planetas internos, pueden presentar fases, como muestra la figura siguiente, en la que se pueden observar las posiciones relativas de Venus y de Marte, el siguiente planeta después de la Tierra. En ella se señalan las posiciones relativas especiales, con una nomenclatura antigua pero en uso. Se habla de «conjunción» cuando el planeta y el Sol están, aproximadamente, en la misma dirección. En muy contadas ocasiones se encuentran exactamente en la misma dirección y, en el caso de que se trate de una «conjunción inferior», se produce el espectacular episodio de un «tránsito» del planeta a través del disco solar. Las fases de Venus, como descubrió Galileo, así como las de Mercurio, ocurren en las posiciones de máxima «elongación al Este» (lucero de la tarde) y de «máxima elongación al Oeste» (lucero de la mañana). Se denomina «elongación» al ángulo «planeta-Tierra-Sol» visto desde la Tierra. A partir de la figura, se puede intuir también que Venus no puede estar en «cuadratura» (elongación de 90°), lo que, en cierto modo, justifica el modelo de Tycho Brahe, y que los mejores momentos para la observación de Marte son cuando se encuentra en «oposición».



Posiciones relativas de Venus y Marte.

es decir: «La madre de los amores (Venus) imita las fases de Cynthia (Diana, o la Luna)». O sea, que Venus tenía fases, como la Luna. Y así interpretó Kepler estos «bárbaros versos latinos»: *Macula ruta in Jove est gyratur mathem, etc.*, que significa: «Hay una mancha roja en Júpiter que gira matemáticamente». Increíble. Cuando Galileo observó los anillos de Saturno, que en su pobre telescopio parecían «orejas» que poseía este planeta, escribió al conocido astrónomo Kepler esta misiva en la que ahora no se molestó en buscar una frase anagramática: *smaisrmilmepoetalevmibvnenvgttaviras;* lo que quería decir Galileo era: *altissimum planetam tergeminum observavi*, que significaría algo así como: «He observado que el planeta más distante es triforme». Pero he aquí lo que interpretó Kepler: *Salve unbistineum geminatum Martia proles*, que significaría: «Salve ardientes gemelos, progenie de Marte». Esta interpretación es increíble también, puesto que Marte tiene efectivamente dos satélites (Fobos y Deimos), que fueron descubiertos mucho después, en 1877, por Asaph Hall (1859-1892).

LA ÓPTICA DE KEPLER

Kepler realizó importantes investigaciones en el campo de la óptica, que se plasmaron en dos obras fundamentales. Una es *Astronomia pars optica* o, simplemente *Optica*, aun cuando su título completo era *Ad vitellionem paralipomena, quipus astronomiae pars optica traditur (Paralipómenos a Vitellio, donde se trata la parte óptica de la astronomía)*. Paralipómenos significa «suplemento» a algún escrito. El título no puede ser más modesto para uno de los libros que más han influido en el desarrollo de la óptica moderna. Vitellio, o Witelo (ca. 1230-ca. 1280), había escrito un tratado de óptica anterior, basado en la obra de Alhacén (965-1040), que fue muy conocido en Europa. El otro trabajo de Kepler es *Dioptrice*, título realmente breve comparado con los otros de Kepler y como era usual entonces. El primero se publicó en 1604, y el segundo, en 1610, en su etapa de Matemático Imperial en la ciudad de Praga.

Una de las razones básicas que motivaron la dedicación de Kepler por la óptica fue la refracción, especialmente la refracción atmosférica. La atmósfera refracta la luz, efecto cuantitativamente más importante cuando la estrella o el planeta están cerca del horizonte. Incluso puede verse una estrella aun cuando haya sobrepasado su ocaso y se encuentre realmente por debajo del horizonte, pues la luz sigue una trayectoria curva. El efecto no es importante para nuestra vida diaria pero sí lo es cuando se quiere trabajar con la precisión que requería Kepler.

Por ejemplo, cuando el Sol se pone, debido a la refracción no lo vemos realmente donde está, sino desplazado angularmente una cantidad equivalente a su diámetro. Es decir que, debido a la refracción, cuando un astro está cerca del horizonte cometemos un error de unos 30'. Ya Tycho se había dado cuenta y había elaborado unas tablas correctoras, aunque no eran muy buenas. Pensaba, por ejemplo, que tales tablas deberían ser diferentes para el Sol, la Luna y para cada planeta. La órbita de Mercurio, en particular, estaba muy deformada por la refracción puesto que solo puede ser visto muy cerca del horizonte.

Reconociendo la importancia de la refracción, se interesó por la óptica y, dada su capacidad de concentración y análisis, pronto llegó a escribir un libro sobre óptica geométrica que podría utilizarse en nuestros días con ligeras modificaciones. Las figuras de los libros actuales sobre la trayectoria de rayos, incluso en diferentes sistemas ópticos, son reproducciones de las que dibujó Kepler.

EL PROBLEMA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

Existe una deformación de las órbitas que puede introducir un error mayor en las posiciones de los planetas que la debida a la refracción. El Sol, por ejemplo, está a 8 minutos-luz, por lo que en realidad lo vemos donde estaba hace 8 minutos. Esto puede suponer un error de 2°. En el caso del Sol podría no importar, pero en el de un planeta como Marte, que tiene una distancia a la Tierra tan variable, ya que puede pasar de 4 a 20 UA, el error puede ser importante. Pero entonces no se concebía que la luz tuviera una velocidad finita.

Se interesó por los efectos de la proyección de imágenes a través de una cámara con pared perforada y por las desviaciones producidas por varios tipos de lentes y espejos planos y curvos, tales como las lentes biconvexas o las bicóncavas. Los conceptos de imagen real, imagen virtual, imágenes derechas e invertidas, aumento, planos focales, etc., fueron introducidos por Kepler. También estudió las gafas de miopes e hipermétropes. Y reconoció el mecanismo de paralaje instintivo que nuestro cerebro utiliza para calcular distancias relativamente cortas.

Lo cierto es que no conocía la ley de Snell-Descartes de la refracción, pero trabajaba con una constante de proporcionalidad entre ángulos incidente y refractado obtenida con experimentos previos. Uno de los grandes méritos de la óptica de Kepler es que aplicó los mismos procedimientos y esquemas para estudiar el funcionamiento del ojo humano, deduciendo la imagen invertida que se forma en la retina.

Ambos libros de Kepler son obras maestras y tenían una finalidad principalmente astronómica. Pero no están exentos de los razonamientos metacientíficos que hervían continuamente en la mente de Kepler. Intentaba deducir las propiedades de la luz procurando comprender la mente de Dios, que la había creado para que los hombres gozáramos de las formas y los colores. Pero basándose en consideraciones tan poco aceptables hoy, e incluso tan poco aceptables para algunos espíritus críticos de su tiempo, llegó a la conclusión correcta y fecunda de que la luz se perdía conforme al inverso del cuadrado de la distancia.

Probablemente los manuales actuales de óptica no hacen justicia al no denominar algunos diagramas o efectos de la óptica geométrica con el nombre de su descubridor: Kepler.

LAS «TABLAS RUDOLFINAS»

Kepler recibió el encargo de elaborar las *Tablas rudolfinas (Tabulae rudolphinae)* en 1601, y se publicaron en 1627. No solo era el libro al que Kepler daba mayor importancia de su vida cientí-

EL INVENTOR DEL TELESCOPIO

Un hecho que muchas veces se pasa por alto en la historia de la invención del telescopio es que Kepler fue el autor de la teoría de este instrumento. No está claro quién fue su artífice, pero al parecer Galileo lo empleó por primera vez como medio de observación astronómica. Sin embargo, este fabricó su propio telescopio a partir de otros de los que había oído hablar, a base de ir probando hasta obtener un resultado satisfactorio. Pero Galileo, a pesar de expresar lo contrario, no conocía su funcionamiento. La combinación de una lente convergente como objetivo y otra divergente cerca del ojo, con el diagrama explicativo correcto, fue realizada por Kepler, quien bien pudiera figurar como inventor del telescopio, o al menos como uno de los que contribuyeron de manera decisiva a su creación. Fue en su obra *Dioptrice* donde expresó correctamente el funcionamiento del instrumento óptico. Galileo nunca se lo reconoció.



Uno de los telescopios construidos por Galileo.

fica, sino que había sido el encargo expreso del emperador Rodolfo II, por lo que era una de sus obligaciones y para lo que estuvo comprometido de por vida. Y lo cumplió, aunque necesitó veintiséis años para llevarlo a cabo.

¿En qué consistían esas tablas? Se trataba de una especie de efemérides en las que se establecían las posiciones de los planetas para un gran intervalo de tiempo, pretendidamente unos mil años, junto con muchos otros datos, tales como posición de numerosas estrellas fijas, eclipses lunares y solares, salidas y puestas del Sol y de la Luna, coordenadas de muchas ciudades, etc. Evidentemente, lo que más cuidado y dedicación requería eran las tablas que permitían obtener la posición de los planetas.

La elaboración de este tipo de tablas había sido siempre una gran empresa para los grandes astrónomos y los grandes príncipes. Famosas habían sido en su tiempo las *Tablas toledanas*, elaboradas por Azarquiel, que fueron ampliamente utilizadas por Copérnico, las *Tablas alfonsíes*, del rey castellano Alfonso X el Sabio (1221-1284), cuya utilización llegó hasta el Renacimiento y que fueron utilizadas por Colón en la predicción de un eclipse, y las de Regiomontano (1436-1476), que eran las que estaban en vigor antes de las tablas publicadas por Kepler.

Tenían un gran valor para astrónomos, astrólogos, marinos, etc. En el caso de las encomendadas a Kepler había una gran expectación, por tratarse de unas tablas obtenidas con los mejores datos (de Tycho Brahe) según el sistema de Copérnico, mejorado por las investigaciones del ya muy reconocido matemático y astrónomo Johannes Kepler. Nunca se habían publicado unas tablas con la precisión y el valor predictivo que se esperaba de estas (aunque en la práctica tuvieron algunas imperfecciones).

Varias fueron las causas de la demora de la publicación, ocupando prácticamente la vida profesional de Kepler, ya que vieron la luz poco antes de su muerte. Esta gran demora se debió a un cúmulo de circunstancias. En primer lugar, su propia dificultad, teniendo Kepler que realizar tediosos cálculos normalmente sin ayuda de colaboradores, ayudantes o calculistas. Las dificultades propias de encontrar un impresor capaz y la ciudad de impresión adecuada y los problemas económicos por los que Kepler tuvo que adelantar o perder un dinero que no tenía, fueron otras causas. Además, como sabemos, en todo este tiempo Kepler se dedicó con entrega absoluta a sus elucubraciones filosóficas relacionadas con su teoría de las distancias y los movimientos planetarios. Las tablas, tarde o temprano, quedarían obsoletas; las leyes del movimiento planetario fueron un legado para siempre y para la humanidad.

Pero Kepler tenía que realizar la gran empresa que Brahe le había pedido en su lecho de muerte y que el emperador Rodolfo II le había encomendado. Nadie sino Kepler podía hacerlo. El emperador había puesto en manos de Kepler los instrumentos y los datos de Tycho. Sin embargo, aquí empezaron los problemas,

pues Kepler tenía los datos, pero estos eran propiedad de los herederos, que quisieron vendérselos al emperador y este comprarlos. Pero el emperador no tenía nunca dinero, ni para esto, ni para pagar a Kepler el salario ofrecido, ni tampoco para los asuntos relacionados con el gobierno del Imperio. Era aficionado tanto a la alquimia como a la química racional y tanto a la astrología como a la astronomía. Hacía todo tipo de colecciones por las que incurría en un auténtico dispendio: pintura, maquinarias, autómatas, joyas...

También por esta razón, Kepler, que tenía asignado un razonable salario, vivió con dificultades económicas y con continuas peticiones y ruegos para que se le pagara lo atrasado y lo adelantado (por él).

Además, los herederos, celosos de que Kepler se llevara el mérito que correspondía a su progenitor, no admitían que los cálculos fueran realizados según el modelo de Kepler. Exigían también que se incluyera una introducción redactada por ellos, protestando si la introducción del propio Kepler era una línea más larga que la suya. Exigían la revisión antes de la edición y la mayor parte de las ganancias. Esta persecución duró todo ese tiempo, empezando con el moscardón de Tengnagel, el yerno de Tycho, cuya relación con Kepler fue siempre mala desde el primer día.

En efecto, ya en la primera visita de Kepler a Tycho, Tengnagel había ido a Praga a recibir al primero, al matemático de Graz. Pero, en lugar de llevarle pronto al castillo de Benatek con su (todavía futuro) suegro, se quedó divirtiéndose en Praga unos días, ante la impaciencia y la irritación de Kepler. Posteriormente, su incompetencia le condujo a la envidia, y la envidia a la persecución obsesiva. Así que este rencor de Tengnagel tuvo también parte importante en la demora de la publicación de las tablas. En la vida de todo héroe ha de haber un villano que vencer, y en la de Kepler fue el taimado Tengnagel, cuyo único mérito astronómico había sido dejar preñada antes de tiempo a la hija de un astrónomo.

También hubo zancadillas cuando Kepler quiso imprimir la obra de Tycho *Progymnasmata*, solo porque veía que eran necesarias una introducción y algunas pequeñas correcciones. Final-



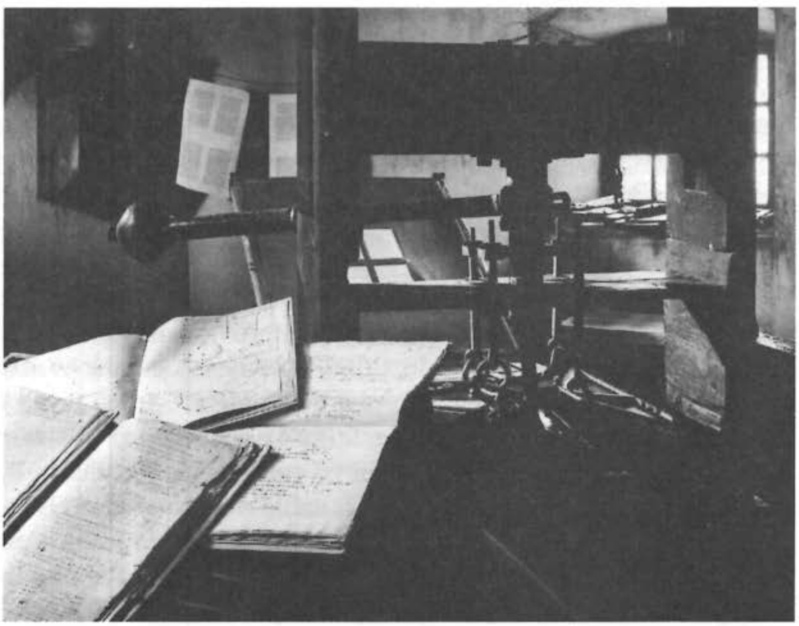


FOTO SUPERIOR:
Johannes Kepler con el emperador Rodolfo II en Praga en 1600. Grabado de F. Bülau (1862).

FOTO INFERIOR:
Imprenta de la época de Kepler, junto a la que aparece un manuscrito de las *Tablas rudolfinas* y otro de su *Optica*.

mente, Kepler tuvo que aceptar el compromiso de no publicar nada que hiciera uso de los datos de Tycho sin la autorización de Tengnagel. Para mayor dificultad, al favorecer Rodolfo II la Contrarreforma, aquel se convirtió oportunamente al catolicismo y fue nombrado consejero imperial de apelación, aumentando así su influencia en la corte. El caso es que los herederos querían una pronta terminación de las tablas, por los beneficios económicos que podía reportarles la herencia de su progenitor y, sin embargo, con su actitud, la entorpecían. Aunque Tengnagel murió en 1622, los hijos de Brahe pusieron tan pertinaces estorbos como los había puesto su cuñado.

«Las *Tablas rudolfinas* que Tycho Brahe concibió como padre, las he portado y desarrollado en mi interior durante veintidós años completos, del mismo modo que el embrión se va gestando poco a poco en el seno de la madre. Ahora me atormentan los dolores de parto.»

— Kepler, en una carta dirigida a su amigo Bernegger.

Cuando Kepler tuvo que mudarse a Linz para ser nombrado Matemático Territorial, las autoridades le mantuvieron el encargo de la finalización de las *Tablas rudolfinas*, además del de elaborar un mapa de la región, molesta misión que le obligó a emprender numerosos viajes, sufriendo la desconfianza, a veces violenta, de los campesinos recelosos.

En Linz no encontró ningún impresor competente, por lo que tuvo que buscar otra ciudad, donde viviría provisionalmente para vigilar la calidad de la impresión. Como la situación militar estaba ya muy enmarañada, no sabía Kepler qué lugar elegir «si uno ya devastado o uno por devastar» *(vastatus an vastandus)*. ¿Estrasburgo, Ulm, Núremberg? No, el nuevo emperador, Fernando II, exigía que se hiciera en Austria. Es notable nuevamente el tesón de Kepler. Como en Linz no había impresor, convenció a uno para que mudara su imprenta allí. Pero finalmente Kepler fue expulsado por su condición de luterano y la impresión se llevó a cabo

en Ulm. Las autoridades de la ciudad consideraron un honor que la impresión se hiciera allí, pero le impusieron un trabajo adicional: regular las unidades de peso y medida.

Desde Ratisbona, donde alojó a su familia, hasta Ulm tuvo que agenciarse un carro, porque el Danubio estaba helado. Así viajó con su equipaje, que incluía los tipos de imprenta que él mismo había fabricado para los signos especiales con que se representan los planetas. Tuvo que encargarse de buscar un papel de calidad, que adquirió en Kempten con su propio dinero. El papel llegó a Ulm, donde fue recibido y custodiado por su amigo Hebenstreit. En aquellos tiempos era extremadamente difícil adquirir un buen papel y esta elección era parte importante en el proceso total de la impresión.

Finalmente, la impresión se terminó en Ulm, en septiembre de 1627. Allí vio la luz lo que Kepler consideraba la gran obra de su vida. No lo fue; hizo cosas mucho más importantes. Todavía hubo muchos problemas creados por los herederos de Brahe, que no estaban nunca conformes con nada. Los primeros beneficios serían para Kepler hasta completar las cantidades que había desembolsado; las sucesivas ganancias habían de repartirse a partes iguales para él y para los herederos.

El bello frontispicio del libro fue diseñado por el mismo Kepler. En él se representaban los grandes astrónomos de todos los tiempos, según su propio criterio: un caldeo, Hiparco, Ptolomeo, Copérnico y Tycho Brahe. Probablemente, el astrónomo caldeo era el gran Kidinnu (siglo IV a.C.). Quizá no fue justo ni con Aristarco de Samos ni con Alfonso X. Él mismo se representaba, trabajando a la luz de una vela, en un humilde lateral.

CAPÍTULO 3

El astrofísico

Se dice que la astrofísica se diferencia de la astronomía en que esta supone que los astros son puntos que se mueven, pero no se consideran como objetos con propiedades físicas internas. En la astrofísica, los astros tienen ya temperatura, composición química, etc. En este sentido, la astrofísica llegaría tras la espectrometría y sería una ciencia reciente, nacida en el siglo XIX. Pero en realidad fue Kepler el primero en decir que la astronomía era inseparable de la física, un honor que la historia ha hecho que comparta con Galileo.

La situación política en Praga se había complicado mucho y fue escenario de crueles enfrentamientos bélicos. El emperador Rodolfo II, que ya padecía la locura y la extravagancia tan común en su sangre, fue obligado a abjurar por su hermano Matías, quien le sucedió como nuevo emperador. Y al poco tiempo murió. Kepler pensó que Praga estaba demasiado revuelta, con conflictos bélicos y religiosos, y sin la protección de Rodolfo II, nada le ataba allí ya. Pensó en volver a Suabia, a su patria, a Württemberg o a Tubinga, pensando que el profesor de Matemáticas, su mentor Mästlin, estaba ya muy viejo. No lo estaba, y de hecho murió bastante después que Kepler. Pero entonces recibió una negativa total de su propia patria. Se le acusaba de creencias calvinistas y de que podía corromper a la juventud con sus tendencias malsanas. Acudió entonces a Linz, solicitando el cargo de Matemático Territorial, el mismo que había desempeñado en Graz. En Linz se decidió crear el cargo para que Kepler fuera a ocuparlo.

También se le ofreció la cátedra de Padua que había abandonado Galileo tras trasladarse a Florencia, y más adelante se le ofreció la de Bolonia. Pero Kepler era luterano, o eso creía él, y no quería vivir en países dominados por la Contrarreforma.

Por aquel entonces sufrió las más duras calamidades. Uno de sus hijos, su predilecto, murió en febrero de 1611 con seis años, y

su esposa Barbara, en julio del mismo año. En enero de 1612 murió su protector, Rodolfo II. Los disturbios bélicos habían dañado mortalmente la cultura en Praga. Así que lo que quedaba de la familia Kepler se trasladó a Linz, con el *caput familiae* como Matemático Territorial. El nuevo emperador Matías le conservó el nombramiento de Matemático Imperial y lo dejó partir a Linz. Persistía entre sus obligaciones sacar adelante las *Tablas rudolfinas*, misión aceptada por las autoridades de Linz.

En dicha ciudad el clima científico y cultural distaba mucho del de Praga. Pero además Kepler sufrió los rigores de la intransi-

EL PROCESO DE BRUJERÍA CONTRA SU MADRE

Este proceso fue espantosamente largo. En aquellos tiempos se produjo una oleada de procesos de brujería en toda Europa, especialmente en Francia y Alemania. Las supuestas brujas confesaban tal condición para no tener que soportar la tortura. En cuestión de catorce años fueron quemadas treinta en el pueblo de Leonberg, donde residía Katharina, la madre de Kepler. Por cualquier cuestión insignificante, la madre de Kepler resultó sospechosa de brujería. Esa simple posibilidad se convertía pronto en una serie interminable de pruebas incriminatorias. No se puede decir que las autoridades religiosas no pusieran empeño en esclarecer la verdad. La primera denuncia fue en 1615 y fue declarada inocente en 1621. Seis años duró el proceso, en los cuales las denuncias y sospechas se iban acumulando como en una avalancha a partir de indicios realmente mínimos. El hijo realizó numerosos viajes para la defensa de su madre y recurrió a todas sus influencias entre los poderosos para evitar que fuera condenada. La defendió incluso asumiendo papeles de abogado. La pobre mujer fue encarcelada, donde sufrió «el frío y la soledad». Querían que confesase, pero ella se negó en rotundo. La amenazaron con el tormento. La llevaron a la sala de torturas para que supiera lo que le esperaba. Se le acusaba entonces de que, a pesar de todas esas amenazas no había llorado, como prueba de su hechicería y culpabilidad. Ella se defendió diciendo que había llorado tanto en su vida que no le quedaban más lágrimas. En la cámara de torturas se negó a confesar: «Haced conmigo lo que queráis. Aunque me arrancarais una a una las venas de mi cuerpo no tendría nada que confesar». Tras estar encarcelada catorce meses, fue exonerada de toda culpa. Pero salió tan dañada de todos los suplicios, que la infeliz murió a los pocos meses de haber recobrado la libertad.

gencia religiosa. Sus ideas se tachaban ora de calvinistas ora de papistas. Se le negó la comunión entre los de su propio credo luterano. Como sabemos, Kepler era luterano pero pensaba libremente, en realidad siguiendo las consignas del propio Lutero, que había defendido la interpretación libre y personal de la Biblia. Pero los ortodoxos de la confesión de Augsburgo le obligaban a renunciar a sus convicciones religiosas personales so pena de excluirlo de la comunidad luterana. Kepler sufrió mucho con esta exclusión, pero no dio su brazo a torcer. No quiso renunciar a la creencia que tenía en común con los papistas de que Jesucristo no



Grabado que muestra el momento en que amenazan a la madre de Kepler en su proceso de enjuiciamiento por brujería.

tenía el don de la ubicuidad. En la actualidad puede parecer algo exagerado, pues creer o no creer en la ubicuidad no parece corroer un principio ineludible. El caso es que fue excluido por sus hermanos de religión y le negaron la eucaristía; le aconsejaban que se dedicara a las matemáticas y se olvidara de temas religiosos, que no eran lo suyo. Su fe fue proscrita por todos, calvinistas, católicos y luteranos, precisamente a él, a quien buscaba la concordia de todos los cristianos. En esto recuerda a Erasmo cuando dijo que en lo único que estarían de acuerdo católicos y protestantes sería en quemarle a él.

KEPLER Y LA GRAVEDAD

Suele admitirse que la contribución más importante de Kepler al acervo científico han sido sus tres leyes del movimiento planetario. Quizá le debemos mucho más porque fue el primero que abandonó la idea de que entender el universo consistía en encontrar una configuración geométrica que reprodujera el movimiento de los cuerpos celestes. También fue el primero que pretendió entender la astronomía como una parte de la física. Había que descubrir por qué se movía el universo y no simplemente cómo se movía. Muchos de sus pensamientos son el anticipo de la gravedad de Newton y parece que, sin emplear exactamente el término de «gravedad», la gran palabra de la física de todos los tiempos, estuviera utilizándola constantemente, allanando el camino que había de llevar a la teoría de la gravitación universal. Kepler murió en 1630; Newton nació en 1643.

En una carta a Longomontano (1562-1647), uno de los más antiguos colaboradores de Tycho, respondiendo al por qué de la osadía de querer aunar ciencias tan dispares como la física y la astronomía, decía que «ambas ciencias se hallan tan estrechamente conectadas entre sí que ninguna puede alcanzar la perfección sin la otra». Fijémonos bien que no solo dice que no hay astronomía sin física, sino que tampoco hay física sin astronomía. Su viejo profesor Mästlin, en cambio, aconsejaba a su admirado ex alumno

que abandonara la idea de buscar hipótesis físicas y se ciñera a las puramente astronómicas. Tras una larga relación epistolar, Mästlin la interrumpió unilateralmente pretextando que, aun suponiendo admirables las teorías de su antiguo estudiante, no era capaz de entenderlas.

Uno de sus mejores biógrafos, Max Caspar, considera, con buen criterio, que Kepler es el fundador de la mecánica celeste. Cierto es que a esa noción llegó alumbrado por la luz de esa vela mística y visionaria que llenaba su mente religiosa. Su camino mental podría resumirse tal que así: el Sol es el centro del universo y de él dimana una fuerza que mueve los planetas. Esa fuerza se pierde con la lejanía al Sol.

Lo cierto es que así explicaba cualitativamente dos de las propiedades de los movimientos planetarios descubiertas por él, inspirándose precisamente en que el gran impulsor debía estar situado en el mismo centro del mundo. Explicaba por qué los planetas más alejados del Sol se movían más despacio. Y explicaba por qué en el perihelio los planetas iban más rápido y en el afelio más lentos.

Aun así, podría pensarse que, según esta idea, no todos los cuerpos pueden crear gravedad, sino solamente el Sol. De ningún modo, porque también la aplicó para entender el movimiento de la Luna en torno a la Tierra, siendo en este caso la misma Tierra la creadora de la fuerza impulsora. «Existe una fuerza en la Tierra que acciona en la Luna.» Esta fuerza se debilitaba con la distancia como lo hacía la del Sol. Por consiguiente, la velocidad de la Luna tampoco será constante. Irá más rápida en el perigeo y más lenta en el apogeo.

¿Cómo se debilitaba esa fuerza con la que el Sol movía los planetas? ¿Qué ley expresaba ese debilitamiento en función de la distancia? No lo dijo expresamente, pero lo que sí dijo es que se debilitaba de igual forma que la luz al alejarse del foco. Y en otra ocasión, demostró que el flujo luminoso se perdía según el inverso del cuadrado de la distancia. Así pues, esa fuerza, esa *vix motrix* que emanaba del Sol y movía los planetas se perdía con el inverso del cuadrado de la distancia. Pero dijo más. En una carta a su amigo Fabricius en 1605, dijo:

> Si se colocara una piedra fuera de la Tierra y se considerara que ambas carecen de cualquier movimiento adicional, entonces no solo la piedra se precipitaría hacia la Tierra, también la Tierra lo haría hacia la piedra; repartirían el espacio que las separa en una proporción inversa a sus pesos respectivos.

La tercera ley de Newton salta y se agita gozosa en este párrafo. Además, aquí se ve que esa «fuerza», aun sin nombre pero ya cerca de tenerlo, que contempla la caída de los «graves», no solo puede estar ejercida por el Sol, y no solo por la Tierra, sino también por una miserable piedra, si bien se reconoce que su efecto no sería mucho.

Y es más, en otra carta propone que la resistencia a moverse de un planeta es proporcional a su masa, si bien, al carecer de datos sobre la masa de los planetas, no pudo sacar mucho partido cuantitativo a esa propiedad.

Dichas las similitudes, ciertamente asombrosas, de sus teorías e intuiciones con la gravedad newtoniana, más repartidas entre sus epístolas que entre sus libros, digamos también las diferencias. La gravedad que, según Newton, crea un cuerpo como el Sol, es creada por su masa. Kepler pensaba que era, más que su masa, su rotación. Si el Sol girase, era este giro lo que emanaba del Sol debilitándose, haciendo girar a los planetas, sobre todo a los cercanos. Esto lo pensó Kepler antes de conocer que el Sol giraba efectivamente, como se comprobó después al observar el movimiento de las manchas solares. Cuando Kepler fue informado, y él mismo observó, que el Sol giraba, lo entendió como un respaldo a su teoría.

Podemos imaginar a Kepler calculando el cuadrado del período de rotación del Sol sobre sí mismo, elevándolo al cuadrado y comparando el resultado con el cubo del radio solar para ver si su tercera ley se cumplía para la superficie del Sol. No hay ningún indicio de que lo hiciera y, si lo hubiera hecho, habría visto que no se cumplía, pero esto no suponía ningún impedimento a la validez de tal ley. Pero, ¿qué hubiera ocurrido si hubiera salido positivo ese cálculo que nunca se hizo?

¿De qué naturaleza era la «fuerza» de «atracción» en el modelo kepleriano? No dijo que fuera de carácter magnético, pero sí

NEWTON Y LOS PAPELES DE KEPLER



Se ha dicho que «el mayor descubrimiento de Newton fue encontrar las leyes de Kepler entre el montón de papeles que Kepler escribió». Esta frase graciosa no deja de tener cierto fundamento, puesto que las leyes de Kepler aparecieron claramente en dos de sus más conocidos libros *Astronomia nova* y *Harmonice mundi*. Sin embargo, si Newton hubiera querido seguir el flujo mental que llevó a Kepler a formular sus leyes, entonces habría tropezado con el lenguaje prolijo y retorcido de los escritos del científico alemán y con que sus razonamientos estaban esparcidos en una multitud de cartas a los amigos muy difíciles de rastrear. Antes de leer los argumentos y ajustes que llevaron a Kepler a la verdad, tuvo Newton que leer todos sus pasos erróneos, que él contaba con toda minuciosidad. Lo que estaba publicado se podía estudiar, pero las cartas privadas no estaban a su alcance. ¿Conoció Newton esa caudalosa correspondencia? El hijo de Kepler, Ludwig Kepler, se llevó los escritos a Königsberg. Cuando este murió, pasaron a poder de D.J. Hevelius, quien los compró a los herederos. Luego recorrieron un largo camino: Leipzig, Viena, Frankfurt... y finalmente acabaron en el observatorio de Pulkovo, en San Petersburgo, tras haber sido adquiridos por Catalina II por consejo de Leonhard Euler. Ahí es donde se conservan actualmente. Con este largo trayecto es imposible que Newton tuviera acceso a ellos.

sospechó que era de este mismo tipo, que podía transmitirse sin un medio material detectable. Kepler conocía muy bien otra gran obra que se adelantó a su tiempo. Esta fue la del inglés William Gilbert (1544-1603), publicada en 1600 con el título *Sobre el imán y los cuerpos magnéticos y sobre el gran imán de la Tierra*, traducido aquí del idioma original en latín.

Kepler llegó incluso a proponer una teoría magnética, errónea y sin ninguna trascendencia en la concepción actual del movi-

miento planetario, según la cual el Sol atraía a un imán terrestre orientando su polo positivo en la dirección al Sol y acelerándolo desde el afelio al perihelio y decelerándolo desde el perihelio al afelio. La verdad se abre paso con una combinación de pasos en la buena dirección y otros tropezones en la mala.

También Kepler nos habló de las mareas, que son en definitiva «rotación diferencial», es decir, diferentes valores de la gravedad en las diferentes partes de un planeta. Las mareas terrestres se deben más a la Luna porque, al estar más cerca, crea una gravedad diferente en los distintos puntos de la Tierra. El Sol crea mayor gravedad en la Tierra pero menos gravedad diferencial. Pues bien, como veremos al tratar de su *Somnium*, Kepler nos habla de los flujos del agua de la Luna por efecto de las mareas conjuntas creadas por la Tierra y el Sol.

«CONVERSACIÓN CON EL MENSAJERO SIDERAL»

Esta obra merece mención especial por contener ideas brillantes y profundas, unas correctas y otras erróneas pero siempre sugerentes, siempre estimulantes y siempre imprescindibles para una historia de la ciencia. Muchos de los conceptos que en la actualidad nos parecen evidentes, nacieron precisamente en ese pequeño libro. Se trata de una conversación, como indica su título, aunque fue una conversación unilateral en la que solo hablaba Kepler. El otro interlocutor, Galileo, no participó en ella. Pero es, después de todo, una confrontación dialéctica entre los dos sabios más ilustres de su tiempo.

Galileo había dirigido su telescopio al cielo y había descubierto una larga serie de fenómenos nuevos. La astronomía telescópica acababa de nacer, demostraba la validez del modelo heliocéntrico y sugería que los cuerpos siderales estaban sujetos a las leyes físicas. Publicó sus primeras observaciones en 1610, en el libro *Sidereus nuncius*, y su noticia corrió como una exhalación por toda Europa. Su título podría traducirse como *El mensajero sideral o* como *El mensaje sideral*. El primero se podía interpre-

tar como arrogante, al sugerir que él, y solo él, Galileo, traía a la Tierra el mensaje de los cielos.

Galileo hizo llegar una copia a Kepler y este respondió diligentemente con una carta con sus comentarios. Pero los corrillos filosóficos de todo el mundo estaban pendientes de su reacción, así que la carta a Galileo se convirtió en libro, un libro breve y delicioso al que Galileo nunca contestó. Esto fue una característica constante en la relación entre estos dos grandes científicos cuyas vidas rondaron el año 1600. Kepler fue mucho más comunicativo, por no decir el único comunicativo. En honor a Galileo, sin embargo, hay que decir que aconsejó que se ofreciera a Kepler la cátedra vacante de Padua. Por otra parte, con más o menos palabras, hubo cierto mutuo respeto y podría pensarse que admiración. El uno, objetivo y orgulloso; el otro, visionario y dialogante. Pero ninguno de los dos, cada uno a su modo, fue modesto.

El libro de Kepler tenía como título *Dissertatio cum nuncio sidereo*, del Matemático del César al Matemático Patavino.

Algunos reprocharon a Kepler que en su escrito dedicaba unas lisonjas excesivas a Galileo, al que se dirige como el eximio, el más capaz de todos, habla de la rectitud de su juicio y de la sutileza de su ingenio, etc. Pero en realidad el escrito es un lobo con piel de cordero. Su trato es cortés, pero su contenido es crítico, aduciendo que en muchas de las ideas de Galileo no se hacía justicia a pensamientos anteriores y, en particular, a los suyos propios. Reclamaba incluso como suyas algunas ideas que ya habían salido anteriormente de su pluma.

Antes de que le llegara a Kepler el *Sidereus nuncius*, por medio del embajador, el gran duque de Toscana, le había llegado la noticia de que Galileo había encontrado cuatro planetas nuevos y, sin más información, se devanó los sesos pensando si eran, como la Luna de la Tierra, satélites de otro planeta, o si estaban entre las órbitas de Marte y Júpiter, o si rondaban en torno a alguna de las estrellas fijas. El libro, ya en sus manos, precisaba que eran planetas joviales, los que hoy llamamos los *satélites galileanos de Júpiter*. En la carta que acompañaba al libro, Galileo animaba a Kepler a comunicarle su opinión. Discutamos los aspectos astronómicos más relevantes que se tratan en este libro.

Kepler recordó a Galileo que el telescopio tenía precedentes, incluyendo un estudio de J. Bautista Porta con título *Magia natural* (1558), en el que se habla de él, aunque ni él mismo valoraba muy bien tal trabajo. Argüía Kepler que él mismo, tras conocer el estudio de Porta en el que se hablaba del telescopio, en su *Optica* había tratado teóricamente las lentes convergentes y divergentes y su combinación. Pero no era exacto: la combinación de lentes, imprescindible en un telescopio, no había sido considerada en su *Optica*, únicamente el efecto de una lente convergente y una divergente se habían dibujado en la misma página.

Él mismo había tenido la tentación de construir un telescopio en el que, como el de Galileo, los aumentos podrían haber sido de 32 veces, lo que equivalía a ver los objetos 32 veces más cerca, y lo que equivalía a un aumento en las superficies observadas de aproximadamente 1 000. ¿Por qué no lo había construido? Porque él había pensado que el aire era «espeso» y emborronaba las imágenes. Si el medio entre la Tierra y la Luna era igualmente espeso la imagen perdería nitidez. Es decir, la Luna aparecería 32 veces más grande pero los detalles no se podrían apreciar, con lo cual, no se adelantaba nada. Ahora, Galileo había demostrado que ese no era el caso. La imagen de la Luna era nítida. La conclusión entonces era que el medio entre la Luna y la Tierra estaba prácticamente vacío. Eso hoy parece una conclusión ingenua, pero en 1610 no lo era en absoluto.

Johannes Pistorio (1546-1608) y Kepler habían mantenido anteriormente una discusión, en la cual Kepler había defendido que las medidas de Tycho no se podrían mejorar nunca y que, por tanto, la astronomía observacional había alcanzado su techo. El error de las observaciones de Tycho era de un par de minutos para los planetas y aun menor para las estrellas fijas. De ahí era imposible pasar. Nadie había sido tan cuidadoso ni había tenido tantos medios como Tycho. En cambio, Pistorio mantenía que, en el futuro, se podrían mejorar si se acudía a las lentes. Así que ahora Kepler tenía que reconocer que Pistorio tenía razón, como había demostrado Galileo brillantemente, con menos palabras y más acción.

También se atrevió Kepler a decir que él haría otro telescopio, e incluso hizo los cálculos para su realización práctica. Lo cierto es que estaba más capacitado que el propio Galileo para diseñar teóricamente un telescopio perfecto. Galileo había llegado a su realización a base de tanteos, aunque defendiese que había explicado su fundamento teórico.

LA LUNA

Las discusiones sobre la Luna hoy nos parecen también ingenuas, pero hay que situarse en 1610, cuando el telescopio empezó a proporcionar una información completamente novedosa. Kepler pretendía rivalizar con Galileo, no con un telescopio sino con un cartón con un agujero y una lente que proyectaba la imagen de la Luna a una distancia de 12 pies. La superficie lunar ofrecía así muchos más detalles que a simple vista, Kepler creía que las partes oscuras eran tierra, y las brillantes, mar, pero reconocía, tras el estudio de Galileo, que era justamente lo contrario, puesto que el telescopio mostraba muchos accidentes semejantes a montañas en las partes brillantes. Esto era especialmente claro en los atardeceres y amaneceres lunares, puesto que la línea que separaba las partes iluminadas por el Sol y las sombreadas era tortuosa. Sin embargo, Galileo estimaba que la Luna no estaba hecha de agua y tierra.

> «La materia del globo lunar no es de agua y tierra.»
>
> — Galileo Galilei.

Además aparecían los hoy familiares cráteres lunares, con sus característicos bordes circulares. La interpretación de Kepler era realmente singular, aunque la propusiese a modo de juego. Suponía que había selenitas. Estos eran más fuertes y grandes que nosotros, ya que tenían que haber alcanzado un gran desarrollo para soportar el calor del día, que allí les duraba un mes. Como eran tan grandes, hacían obras grandes. Ellos habían elevado esos bordes inmensos circulares para defenderse del Sol e iban recorriéndolos según su

DE ARISTARCO A BRUNO



Nur ad-Din al-Bitruji fue el primer astrónomo después de Ptolomeo que presentó una alternativa a su modelo del cosmos. Para Al-Bitruji el movimiento planetario respondía a causas físicas.

El primer modelo heliocéntrico conocido se debe a Aristarco de Samos (310 a.C.-230 a.C.). Su concepción se basaba en medidas y no en meras elucubraciones. Conoció la proporción entre la distancia Tierra-Sol y la distancia Tierra-Luna. Observando un eclipse de Luna determinó el tamaño del satélite y, por tanto, su distancia y, de ahí, la distancia al Sol y su tamaño. Al determinar que el Sol era mucho más grande que la Tierra y que la Luna, concibió de forma clara y precisa su modelo heliocéntrico. En la Edad Media cabe mencionar al muladí cordobés Averroes (1126-1198) y especialmente a su discípulo Al-Bitruji (m. 1204) y a Nasir al-Din al-Tusi (1201-1274), de Maraga, Persia, como defensores de la hipótesis heliocéntrica. Siempre se había considerado que las órbitas eran circunferencias contenidas en esferas porque se aceptaba la idea aristotélica de que el círculo era la figura más perfecta. Como las órbitas reales no lo eran y, especialmente, la Tierra giraba en realidad alrededor del Sol y no al revés, los modelos geocéntricos tuvieron que incluir epiciclos y otras complicaciones siempre basadas en círculos y más círculos. Un círculo puede ser una figura simple y perfecta, pero dos círculos ya no son un círculo, corrompiendo así la sencillez y perfección aristotélicas. La descripción medieval del cosmos era muy complicada, aunque fuera muy precisa. Esta complicación hizo que, posteriormente, Voltaire pusiera en boca de Alfonso X la frase «Si Dios me hubiera consultado sobre el sistema del universo, le habría dado unas cuantas ideas». Copérnico mantenía la idea de la perfección del círculo, por lo que también tuvo que añadir epiciclos. Y así procedió Tycho Brahe. Fue Kepler quien prescindió de círculos y más círculos. Pero seguía manteniendo el Sol en el centro del universo. Fueron Nicolás de Cusa y Giordano Bruno quienes propusieron que ni la Tierra ni el Sol estaban en el centro... porque no había centro.

orientación. También estos farallones podían estar excavados por los selenitas para dotarse de una mayor protección. El interior de lo que hoy llamamos cráteres lo utilizaban para la siembra. Estos aparecían frecuentemente a modo de agujeros, que Kepler pensaba

que eran pozos. Reconozcamos que la explicación actual consistente en que son resultado del bombardeo meteorítico era difícil de imaginar entonces. Kepler creía que la Luna era de un material poroso semejante a la piedra pómez, por lo que su densidad debía ser baja. Eso le parecía consistente con su teoría de que el giro de la Tierra producía una fuerza similar a la magnética que hacía rotar a la Luna. La Luna giraba muy deprisa y, como su movimiento era inversamente proporcional a su masa, eso significaba que su densidad debía de ser muy baja.

Interpretaba la luz del limbo lunar como la prueba de la existencia de una atmósfera, apoyándose además en que Mästlin decía haber observado una nube inmensa y negra, probablemente portadora de una gran tormenta. Galileo, por su parte, pensaba que si hubiera habido grandes nubes, él las habría observado con su telescopio.

Los comentarios de Kepler son más fantásticos que los de Galileo, quien era escéptico, en general, con las ideas místicas de su colega alemán. Para no hacer palidecer la brillantez de Kepler digamos que ambos interpretaron correctamente la luz cenicienta. Se trata de la luz que presenta la Luna nueva: luz solar que se refleja en la Tierra, su reflejo llega a la Luna y allí se refleja nuevamente hacia la Tierra. La luz rojiza de la Luna eclipsada, que tanto le maravilló de niño, Kepler pensó, también correctamente, que era debida a la refracción en la atmósfera terrestre, mientras que Galileo suponía que era una especie de alba, semejante a los amaneceres terrestres.

En este apartado, Kepler cita a Averroes, cuyas obras debía de conocer. Este sostenía ideas próximas al heliocentrismo, sistema que Kepler reconoció como indiscutible desde el primer momento que lo oyó. Es posible que Kepler tuviera algún antecedente bibliográfico anterior a Copérnico.

LAS ESTRELLAS FIJAS

Tampoco estuvo Kepler acertado en la interpretación de las estrellas fijas, pero suscitó un debate apasionante, relacionado con la

infinitud del universo y la hoy llamada *paradoja de Olbers* (véase el apartado siguiente).

Galileo había revelado que las estrellas llamadas fijas observables a simple vista eran muchas menos (unas 6000) que las que se podían ver con el telescopio, más de 10000. Este hecho ponía nuevamente sobre la mesa la cuestión de si el universo era infinito, como quería Bruno, y también Nicolás de Cusa y W. Gilbert, o si era finito, como propugnaban Copérnico y Kepler. La opinión de Galileo quedó algo relegada: tenía que ser en este aspecto muy prudente, pues hacía solo seis años que Bruno había muerto en la hoguera, a poca distancia de su ciudad.

EL PODER DE RESOLUCIÓN

Debido a la difracción, un instrumento óptico no puede producir imágenes con ilimitado detalle. La imagen de un punto es una figura ensanchada por la difracción. Cuando las dos figuras correspondientes a dos puntos angularmente vecinos tienen un apreciable solapamiento, no podemos distinguir entre esos dos puntos que se hacen indiscernibles; no podemos apreciar los detalles para longitudes del orden de ese ángulo mínimo. Concretamente ese ángulo mínimo se calcula aproximadamente mediante:

$$R = 1{,}22\frac{\lambda}{D},$$

donde λ es la longitud de onda observada y D el diámetro de abertura del telescopio. El poder de resolución es tanto mayor cuanto más pequeño es el ángulo R. El ojo humano, como instrumento óptico, con una pupila de 2 mm observando luz de 500 nm, ya hemos visto que tiene un poder de resolución de 1'. Un telescopio óptico de aficionado de 30 cm tiene unos 0,5", y uno óptico profesional, de 4 m, tiene 0,01". Sin embargo, aparece otro efecto que limita la resolución y es la turbulencia atmosférica, que produce imágenes de aproximadamente 1", dependiendo del lugar de observación y del día. La turbulencia produce variaciones aleatorias del índice de refracción que hacen que la incidencia de la luz de una estrella no se produzca siempre en un mismo punto, ensanchando la imagen; este efecto se expresa con el término inglés *seeing*. El mayor telescopio óptico, el GRANTECAN (Gran Telescopio de Canarias), de 10,4 m, situado en la isla de La Palma, tiene un poder de resolución de $2\cdot10^{-4}$ minutos de arco. Todos estos grandes telescopios deben utilizar

El telescopio no solo aumentaba los tamaños y acercaba las distancias, sino que, además, recogía más luz, puesto que tenía más superficie colectora, la superficie del objetivo, mucho más grande que la pupila humana. Por eso se veían estrellas que antes, a simple vista, no podían verse. Si se aumentase aun más el poder de ampliación de un telescopio, ¿aparecerían aún más estrellas fijas? ¿Por qué las nuevas que habían aparecido eran menos brillantes, porque estaban más lejos o porque eran menos luminosas intrínsecamente?

La infinitud del universo estaba relacionada con el heliocentrismo. Si el universo era infinito no podía haber un centro; el Sol no podía estar en el centro, sencillamente porque no había centro.

técnicas especiales para evitar el *seeing*, como es la óptica adaptativa, en la que un espejo deformable adopta una forma que compensa la deformación de la imagen. Los telescopios en órbita, como el telescopio espacial Hubble, no tienen esta limitación. La lente de uno de los telescopios construidos por Galileo tenía 33 mm de diámetro, por lo que el poder de resolución era unas 16 veces mejor que el del ojo humano, de un ángulo de unos 4'', con lo cual el tamaño aparente de una estrella disminuía, al contrario que el de la Luna, que aumentaba. Kepler lo atribuía a que el telescopio mejoraba la concentración de rayos en la retina. En aquel tiempo hubiera sido imposible pensar otra cosa.



El Gran Telescopio de Canarias, el mayor telescopio óptico del mundo, situado en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma.

La postura de Kepler era que el universo era finito, que había una cavidad en la distribución de estrellas, precisamente ocupada por el Sol y los planetas, y que en ningún otro lugar del universo podía verse algo parecido a lo que se veía aquí. Estábamos realmente en un punto singular del universo. A esta concepción le llevaba también su credo religioso y se basaba en observaciones y argumentos supuestamente objetivos.

Él pensaba que las estrellas fijas tenían un tamaño angular de aproximadamente un minuto de arco; había algunas más grandes, pero no se observaban más pequeñas. Tanto las más como las menos brillantes parecían tener el mismo tamaño. Entonces, pensaba Kepler, si hubiera estrellas más lejanas, con el mismo tamaño angular, tendrían que ser más grandes, cada vez más grandes cuanto más lejos. Era más lógico pensar que eran todas más o menos del mismo tamaño y que estaban todas a la misma distancia. Los futuros telescopios no podrían observar muchas más porque no cabrían en el cielo.

¿Dónde estaba el error de este razonamiento? Hoy nos resulta fácil detectarlo. El tamaño angular de las estrellas no es un minuto de arco; lo que es un minuto de arco es el poder de resolución del ojo humano. La resolución de cualquier instrumento es el ángulo más pequeño tal que dos puntos puedan ser separados sin que sus imágenes se confundan. Lo que hace que la imagen de un punto «se ensanche» y pueda solaparse con la imagen del punto vecino es la difracción de la luz, consecuencia de su carácter ondulatorio. La imagen de un punto, en cualquier ojo o telescopio, no es un punto, sino una figura de difracción que tiene una determinada anchura.

Este ángulo en la imagen, que nos indica cómo se ensancha un punto observado, se calcula aproximadamente dividiendo la longitud de onda por el diámetro de abertura del telescopio o del aparato de medida. El resultado viene expresado en radianes. Si la luz visible tiene una longitud de onda de 500 nm y la pupila del ojo tiene 2 mm, resulta que el ojo humano tiene un poder de resolución de un minuto de arco, precisamente el valor que atribuía Kepler al tamaño angular de las estrellas. No está nada mal, tenemos un ojo realmente maravilloso, aunque nada comparable con el poder de resolución de un telescopio de 10 m.

El tamaño angular de las estrellas no era su tamaño angular real; en realidad, era una limitación del ojo humano impuesta por la difracción de la luz, fenómeno desconocido en 1610. No se le puede pues reprochar a Kepler su razonamiento. Era una brillante pero errónea demostración de que el universo no podía ser infinito. Además, en su contestación a Galileo Kepler bromeaba que si el universo fuera infinito las escenas se repetirían. Por ejemplo, podrían existir dos Galileos (o tres, o más, o infinitos).

LA PARADOJA DE OLBERS

Formulada por el astrónomo alemán Heinrich Wilhelm Olbers (1758-1840), esta paradoja nos introduce, con un razonamiento elemental, en el corazón de la cosmología. Supongamos que dividimos el espacio que nos rodea en capas de cebolla (capas concéntricas) de espesor constante. La luz de las galaxias se pierde según el inverso del cuadrado de la distancia. Pero el área de las capas de cebolla aumenta con el cuadrado de la distancia, por lo que si razonablemente suponemos que la densidad superficial de galaxias en el universo es constante, también el número de galaxias en cada capa de cebolla aumenta según el cuadrado de la distancia. Por tanto, ambos efectos se compensan y concluimos que todas las capas contribuyen con la misma luz recibida aquí. Como, en principio, podemos suponer ilimitado el número de capas hasta el infinito, se obtiene la paradójica conclusión de que deberíamos recibir una luz infinita del cosmos.

La paradoja se resuelve pensando que el universo ha podido tener un principio temporal. Si es así, la luz de galaxias muy distantes no ha podido llegar hasta nosotros porque la velocidad de la luz es finita. Concretamente, no puede llegarnos luz de galaxias que están a más de ct, siendo c la velocidad de la luz y t el tiempo de vida del universo.

Es adecuado sacar a relucir esta paradoja porque suele afirmarse que Kepler la había formulado mucho antes que Olbers. Reproduzcamos el párrafo de Kepler, contenido precisamente en la *Dissertatio*, en el que nos dice algo relacionado con ella:

> Pues bien, si tomásemos solo mil de las [estrellas] fijas, no siendo ninguna de ellas mayor de un minuto [si bien en los registros la mayoría son mayores], y si las juntásemos todas en una superficie redonda, igualarían [y aun superarían] el diámetro del Sol. ¿Cuánto más no habrían de superar en tamaño visible a la imagen del orbe solar diez mil pequeños discos de estrellas reunidos en uno? Si esto es cierto, y si dichos soles son del mismo tipo que nuestro Sol, ¿por qué todos esos soles no superan en resplandor a este Sol nuestro? ¿Por qué todos ellos transmiten una luz tan débil a los lugares más abiertos, siendo así que el Sol que brilla en una cámara cerrada a través de un agujero practicado con la diminuta punta de una aguja inmediatamente supera la claridad de las propias fijas?; y siendo la diferencia casi infinita, ¿cuál habría de ser si se retirase toda la habitación? ¿Me dices que se hallan alejadísimas de nosotros? De nada sirve, pues cuanto más lejos están, tanto mayor que el diámetro del Sol es el de cada una de ellas. ¿Que tal vez el éter interpuesto las oscurece? Ni hablar: pues las vemos con sus centelleos y con sus diversas formas y colores, lo que no ocurriría si la densidad del éter representase algún obstáculo.

Es decir, que Kepler pensaba que el Sol era mucho más brillante que las estrellas fijas, por lo que no era una más como suponía Bruno. Esto era consistente con su idea de que vivíamos en el centro del universo; no nosotros en la Tierra, pero sí el Sol. Las estrellas fijas no podían estar a cualquier distancia porque entonces serían tanto más grandes cuanto más lejos estuvieran. En esto, sus razonamientos rozaban la paradoja de Olbers, puesto que una forma de escapar de ella es suponer el universo finito en el espacio, como él lo concebía. Si el universo es finito (o el mundo, como él decía), y si no vemos más estrellas por un sitio que por otro, tenemos que estar en el centro.

Realmente, aunque los razonamientos están próximos, no puede concluirse que en este párrafo esté contenido un antecedente de la paradoja de Olbers. Ni siquiera atendiendo a que la paradoja ha de formularse con galaxias y no con estrellas. Vuelve Kepler a creer que las estrellas tienen un tamaño real de 1', cuando en realidad este ángulo corresponde al poder de resolución del

ojo humano y no representa nada intrínsecamente relacionado con el tamaño verdadero de las estrellas. También puede resultar curioso hoy que se haga mención a un éter absorbente. El éter sería lo que hoy llamamos medio interestelar. Tycho había supuesto que la estrella nova que él estudió se había formado por condensación de este éter interestelar, idea que había convencido a Kepler. El nacimiento de las estrellas por colapso del medio interestelar, como hoy se concibe, está en razonable acuerdo con la hipótesis de Tycho.

Pero Kepler rechaza que este éter absorba la luz de las estrellas porque la «forma» y el color de las estrellas no se modifican. Hoy sabemos que el medio interestelar contiene polvo absorbente, aunque la posible existencia de materia absorbente intergaláctica no puede explicar la paradoja de Olbers: la materia absorbente se iría calentando y acabaría emitiendo tanto como absorbiera.

¿A qué distancia está el «muro» de las estrellas fijas? En aquellos tiempos era imposible saberlo. Sin embargo, en esta sustanciosa carta-libro se hace un cálculo. Se dice que la distancia a las estrellas fijas es tres mil veces la órbita de Saturno (sin especificar de dónde sale este número) y que la órbita de Saturno es diez veces mayor que la de la Tierra (básicamente correcto). De ahí se deduce que las estrellas fijas han de estar a $3 \cdot 10^4$ UA (recordemos que 1 UA es la distancia media Sol-Tierra). Las estrellas que vemos, las más representativas, están como a 10 parsec, lo que equivale a $2 \cdot 10^6$ UA. Una diferencia de un orden de magnitud no está nada mal. ¿Sonó la flauta por casualidad? En realidad, en aquella época era imposible encontrar la paralaje de una estrella, es decir, obtener la distancia de una estrella por medio de una triangulación, pero ¿podía obtenerse la distancia típica a las estrellas que vemos por otros métodos?

La discusión es, como vemos, de todas formas, muy estimulante y aleccionadora, mostrándonos cómo los conceptos que hoy tomamos como bien sabidos tuvieron que llegar a consolidarse a base de palos de ciego. Palos de ciego podrían ser, efectivamente, los intentos desesperados de un astrónomo casi ciego (o con una visión tan defectuosa que Sirio le parecía del tamaño de la Luna) para escudriñar los objetos por debajo del minuto de arco. Mu-

chas dudas irían menguando al crecer el tamaño de los telescopios. La carrera por conseguir telescopios más y más grandes continúa sin freno en nuestros días; baste pensar en los futuros E-ELT *(European Extremely Large Telescope)*, de 39 m, o el SKA *(Square Kilometre Array)*.

Hay que advertir en la discusión de la paradoja de Olbers que hoy, contra la percepción de la intuición ingenua, la relatividad general nos permite concebir un universo finito en el espacio, pero sin centro ni bordes ni punto singular alguno.

LAS NEBULOSAS

Con este término, Kepler se refiere a la Vía Láctea, pues no hay otra nebulosa que pudiera observarse sin telescopio, exceptuando las Nubes de Magallanes, de las que quizá Kepler tenía noticia al haber sido descubiertas para nuestra cultura un siglo antes, en el viaje de Magallanes y Elcano. Suele decirse que Galileo fue quien propuso que la Vía Láctea era en realidad un conjunto muy grande de estrellas. Kepler hurtó el mérito a Galileo por pensar que otros ya lo habían creído antes. La Vía Láctea era una «reunión de estrellas, cuyas luces se confunden por la torpeza de la visión».

LOS SATÉLITES DE JÚPITER

Como los cuatro nuevos «planetas» no se alejaban más de 14' de Júpiter, no estaban en conflicto con la conclusión del joven Kepler de que solo podía haber seis planetas, como se decía en el *Mysterium cosmographicum*. Con una pequeña holgura que hubiera entre sólidos perfectos y órbitas planetarias, podrían existir estos nuevos planetas sin desmantelar el sistema kepleriano. Calculó cómo verían los habitantes de Júpiter o Saturno nuestra Luna y para ellos tampoco nuestro satélite se apartaría mucho más de esos pocos minutos. El nombre de «satélite» para la Luna y para los cuatro planetas nuevos de Júpiter fue precisamente introducido por Kepler.

Galileo llamó a los satélites de Júpiter «estrellas mediceas» para dedicárselas a la familia de los Médicis, su mecenas. Pero los nombres actuales de estos satélites fueron puestos por Simon Marius (1573-1624), por sugerencia de Kepler. Estos nombres son Ío, Europa, Ganímedes y Calisto. Salvo el tercero, son nombres de amantes de Júpiter.

> «Kepler es el padre conjunto de estas cuatro estrellas.»
>
> — Simon Marius, refiriéndose a los cuatro satélites de Júpiter.

Hemos visto que la filosofía religiosa de Kepler le había conducido a grandes hallazgos. Veamos ahora todo lo contrario. Júpiter tiene que estar habitado —pensaba Kepler—, pues nuestra Luna sirve a nuestra astrología. No sirven a esta los cuatro nuevos satélites pues no los vemos, salvo que estemos mirando continuamente por el telescopio. ¿Para qué sirven entonces? Tienen que servir para la astrología de los habitantes de Júpiter. Luego Júpiter está habitado. ¿Cómo son los habitantes de Júpiter? Son menos nobles que nosotros, puesto que Júpiter es menos noble que la Tierra. Una razón para entenderlo es que nosotros estamos en el medio, con tres astros «por debajo» (el Sol, Mercurio y Venus) y otros tres «por arriba» (Marte, Júpiter y Saturno). Nosotros podemos saber que estamos en el medio porque desde donde estamos observamos Mercurio. Pero un habitante de Júpiter no lo vería, luego no le serviría para su astrología; su astrología sería más pobre, etc. Y así seguía con otros razonamientos medievales por el estilo.

LA ESTRELLA «NOVA» DE KEPLER

En 1604 tuvo lugar uno de esos singulares acontecimientos, tan escasos en la historia escrita, como es la aparición de una supernova. No fue él quien la descubrió pero, como Matemático Imperial, debía publicar su estudio y su opinión. Así lo hizo en la obra

De stella nova in pede serpentarii, por lo cual lleva el nombre actual de *supernova de Kepler*. Apareció en la constelación de Ofiuco (Serpentario) muy cerca de Sagitario, por tanto en la Vía Láctea.

Este libro, como no podía ser menos siendo Kepler el autor, es muy extenso. De la supernova —entonces simplemente llamada nova— ¿qué se podría decir en 1606, fecha de la publicación? El lugar de aparición, la duración, la variación de su brillo con el tiempo y alguna conjetura sobre su naturaleza y poco más. Sin embargo, la obra tiene treinta capítulos. Además, se trata nuevamente de una mezcla de creencias astrológicas y religiosas, junto con una escrupulosa atención a los datos.

No está claro quién la descubrió. Seguramente muchos, porque entonces la gente conocía bien el cielo. El caso es que acaba-

¿QUÉ ES UNA SUPERNOVA?



Aspecto del remanente de la supernova de Kepler en la actualidad.

Una supernova es una explosión final de una estrella muy masiva. Esta explosión también se produce cuando una estrella enana blanca recibe material procedente de otra estrella gigante roja compañera. Su emisión se hace tan intensa que tiene un brillo superior a toda la galaxia que la alberga, es decir, típicamente emite tanto como 10^{11} veces el Sol. También emite en otras longitudes de onda y es una fuente de neutrinos y rayos cósmicos, sobre todo protones y electrones a velocidades relativistas. En ellas se forman casi todos los elementos químicos más pesados que el hierro. El hecho de que en la Tierra haya oro, plomo, uranio, etc., indica que la materia de la que estamos hechos ha vivido estas violentas explosiones. La razón es que las estrellas normales (llamadas de la *Secuencia Principal*) pueden formar los elementos menos pesados, hasta el hierro, mediante procesos de fusión, que son exotérmicos. Pero para producir elementos más pesados que el hierro se necesitan grandes sumas de energía, como las que se establecen en una explosión de supernova.



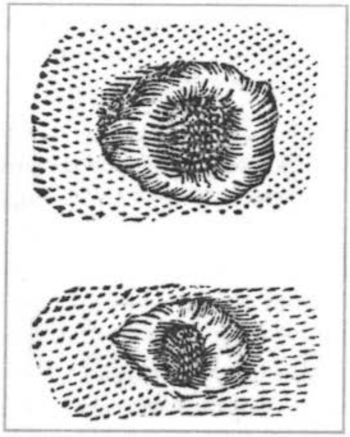


FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Ilustración realizada por Kepler sobre el aspecto de la Luna, aparecida en su obra *Dioptrice* en 1611.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Así es como Galileo representó los cráteres de la Luna que había observado con su telescopio. La ilustración se incluye en una carta dirigida al astrónomo jesuita Christopher Grienberger en 1611.

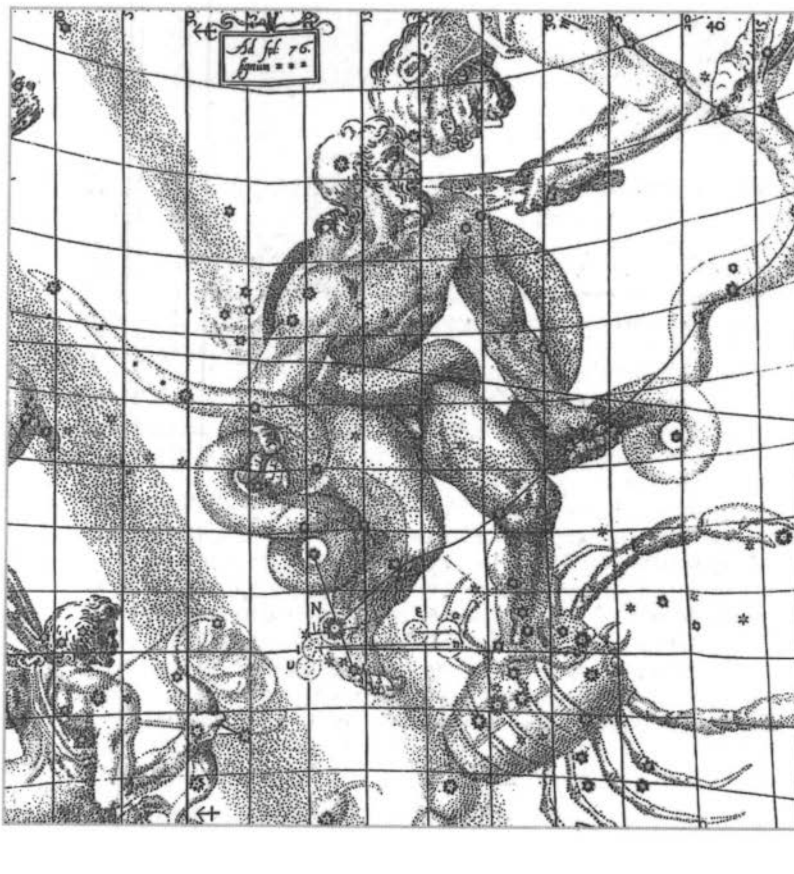
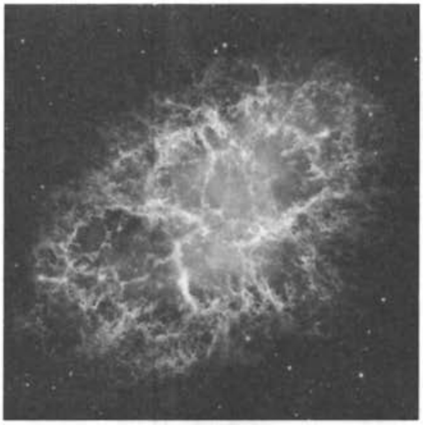


FOTO INFERIOR:
Grabado aparecido en *De stella nova*, obra que Kepler dedicó al estudio de la supernova que contempló en 1604. Apareció en la constelación de Ofiuco (Serpentario), representada aquí como un hombre sujetando una serpiente, junto a cuyo pie derecho aparece el resplandor de la supernova.

SUPERNOVAS HISTÓRICAS



Aspecto actual de la Nebulosa del Cangrejo, remanente de la explosión de una supernova en el año 1054.

Si nos limitamos a aquellas que se han interpretado en la actualidad como inequívocamente supernovas, en nuestra propia galaxia aparecieron cuatro antes de la supernova de Kepler, en un intervalo de tiempo de alrededor de seiscientos años. Después de esta última, al parecer ya no se han producido más. En este sentido, nuestra galaxia parece ser ligeramente menos activa que otras similares. La supernova más antigua de la que se tiene noticia puede haber sido la que tuvo lugar en el año 1006, descrita por el astrólogo y médico egipcio 'Ali b. Ridwan (988-1067), de quien se conservan dos autobiografías, una en árabe y otra en latín. Su *Comentario* fue mandado traducir por Alfonso X el Sabio a Egidio de Tebaldis y a Petrus de Regio. Dicha supernova ha sido identificada actualmente con la fuente Sco X-3 por B.R. Goldstein. También fue observada en Suiza, Irak, China y Japón. Brilló como media luna y con su luz era posible ver objetos por la noche. La supernova más conocida por su estudiada remanente (*Supernova Remnant*; SNR) y por ser una fuente intensa de rayos X, es la Nebulosa del Cangrejo. Se produjo en 1054 y fue descrita detalladamente por los astrónomos chinos. En el *Wenxian Tongkao*, compilado por Ma Duanlin en 1280, se cita: «En Zhihe del reino, primer año, quinto mes lunar, día jichou. Una estrella invitada ha aparecido al Sudeste de Tianguan, puede estar a varias pulgadas de distancia [¿?]. Después de más de un año, se dispersó y desapareció». Fue visible durante el día. Fue también registrada por los astrónomos japoneses, pero no parece haber ninguna noticia documentada en Occidente. En 1181, también en China y en Japón, se describió otra supernova, de la que se asegura que duró más de 185 días, si bien los datos son escasos. La llamada supernova de Tycho apareció en la constelación de Casiopea en 1572. Fue estudiada especialmente por el astrónomo español Jerónimo Muñoz (1520-1591), a quien Tycho atribuye su descubrimiento y descripción, en los que basó su estudio, y lo cita con gran reconocimiento. Su brillo era superior al de Venus.

ron llegando a Kepler numerosas noticias de toda Europa, aunque con el consabido retraso. Muy interesante es la observación del astrónomo Antonio Laurentino, quien dice:

> En primer lugar apareció pequeñita y luego, día a día, iba creciendo hasta aparecer en toda su grandeza con luz no muy inferior a la de Venus, pero superior a la de Júpiter.

La luz de las supernovas tiene un período de crecimiento antes del máximo para luego decrecer en períodos mucho más largos. Entonces, Laurentino fue capaz de apreciar la aparición de la supernova cuando aún era muy «pequeñita», para lo que se requieren grandes dotes de observador.

Sin embargo, Kepler lo niega y afirma que la estrella apareció bruscamente con todo su esplendor desde el principio. El 28 de octubre ya fue vista por muchos observadores, aunque no por él, puesto que había nubes, obedeciendo a sus propias estimaciones astrológicas.

Los once primeros capítulos versan sobre cuestiones astrológicas. En este caso está algo justificado, porque la nova apareció en una conjunción llamativa de Júpiter, Saturno y Marte y además en el «Trígono de Fuego», que no es más que un triángulo astrológico formado por los signos del zodíaco Aries, Leo y Sagitario, donde resulta que se produce la conjunción de Júpiter y Saturno cada ochocientos años. Esto es un hecho ciertamente resaltable, ya que, causados por esta conjunción, eran esperables grandes acontecimientos, lo que explica que hubiera tanta atención en aquellos días a los fenómenos celestes especiales.

Pero, además, la estrella nova apareció junto a estos planetas. Nos lo precisa Kepler con todo detalle: «Entre la nueva y Júpiter 3° 28½'; Marte a 8° 31'; Saturno a 6° 12' o 6° 14'». Ciertamente tal casualidad era muy notoria, por lo que algunos astrólogos atribuyeron la formación de la nova como engendrada por estos planetas. Kepler lo rebatió certeramente. Anotó cuidadosamente la distancia angular de la nova a otras fijas durante un largo período de tiempo. No observó paralaje alguno, por lo que dedujo que la nova era «fija» y estaba situada a mucha mayor

distancia y era mucho más grande que los planetas en cuestión. «Un elefante no puede ser engendrado por una mosca.»

¿Cuál podía ser entonces la causa de la formación de la nova? Esta pregunta era también importante en aquel entonces. La idea aristotélica de que la esfera de las fijas era inmutable había llegado con poca discusión hasta el siglo XVI. Una estrella nova era la prueba de que esto no era así. La explicación que defendió Kepler fue la dada por Tycho Brahe anteriormente, quien había estudiado otra nova aparecida en 1572, cuando Kepler tenía solo un año. La hipótesis de Brahe era ciertamente interesante: la nova se había formado a partir del éter de la Vía Láctea, parecido a como hoy diríamos se forman las supernovas de tipo II, cambiando la palabra «éter» por «medio interestelar». Según palabras de Kepler en este libro:

> La estrella aparecida aquel año estaba formada y compactada por materia de la Vía Láctea que andaba dispersa por el espacio de este famoso hiato y que una vez consumida y como despojada de toda materia y cuerpo de estrella, aquel lugar quedó abandonado y vacío de su luz blanquecina.

Podría haber cierta semejanza entre esta hipótesis y el punto de vista actual sobre la formación de un «resto de supernova», aunque, en lugar de desaparecer todo «cuerpo de estrella», diríamos hoy que quedaría una estrella de neutrones. Más adelante lo dice de otro modo:

> La materia de la nova fue asumida y tomada por ella en la propia esfera de las fijas, y una vez extinguida la estrella, volvió a reintegrarse de nuevo —su materia, digo— en la misma esfera de las fijas.

Para respaldar esta hipótesis original de Brahe, le parecía observar una especie de hueco en la Vía Láctea allí donde había aparecido la supernova.

La supernova fue languideciendo hasta acabar siendo inobservable al cabo de un año aproximadamente. El comportamiento fue muy parecido al de la supernova de Tycho Brahe, anotó Kepler.

PERÍODOS DEL MUNDO

Algunas afirmaciones de Kepler hoy nos escandalizan por su credulidad. La conjunción de Júpiter y Saturno en el Trígono de Fuego estaba asociada, como hemos dicho, a grandes acontecimientos históricos. He aquí la tabla presentada por Kepler en este mismo libro que comentamos:

Períodos	Años a.C.	Años desde el origen del mundo	Personajes insignes	Sucesos que tú, lector, dirás si son atribuibles al Trígono
1	4000	0	Adán	Creación del mundo
2	3200	800	Enoc	Latrocinios, reyertas, aparición de ciudades, artes, gobierno de tiranos
3	2400	1600	Noé	Diluvio
4	1600	2400	Moisés	Salida de Egipto, Tablas de la Ley
5	800	3200	Isaías	Culturas: griega, babilónica, romana
6	Post Cristo	4000	Jesucristo	Monarquía romana. Nueva Ntro. Señor
7	800	4800	Carlomagno	Imperio de Occidente y sarracenos
8	1600	5600	Rodolfo II	Nuestra época, donde vivo y estoy trabajando
9	2400	6400		

En la columna de sucesos del futuro período 9 escribió: «¿Dónde estaremos nosotros y qué será de nuestra espléndida nación germana? ¿Quiénes serán nuestros sucesores? ¿Se acordarán de nosotros? Esto si el mundo dura aún...». También llama la atención que sitúe a su protector Rodolfo II junto a personajes tan ilustres como Adán o Jesucristo. Pero, claro, lo que más llama la atención es que Kepler pensara que el mundo había sido creado hacia el año 4000 a. C. En otro lugar, concretamente en el *Mysterium*, había estimado que la creación había tenido lugar el 27 de abril del año 4977 a. C.

LOS COMETAS

Kepler fue admirado en Praga por su talento como matemático y astrónomo. Pero aun era más popular como astrólogo y calendarista, con sus esperados almanaques, en los que presentaba sus vaticinios meteorológicos y auguraba futuros sucesos. Los vaticinios cumplidos pasan a la historia con más facilidad. En el almanaque de 1618 predijo una gran guerra. Y efectivamente, empezó la guerra llamada de los Treinta Años.

Y también predijo un cometa. En eso se equivocó: no apareció uno, aparecieron tres. En 1607 había predicho otro que con el tiempo se llamaría *Halley*. También estaba la gente pendiente de la interpretación de estos vistosos astros y de su significado. Kepler aseguraba que la trayectoria de los cometas era rectilínea (¡precisamente él!). A tenor de lo que sabemos hoy, erraba en esto; pero hoy es fácil decirlo. Admitía un influjo maligno cuando la cola invadía la Tierra, cuyo aire quedaba envenenado, presagiando calamidades para la humanidad.

Kepler pensaba que «los rayos del Sol atraviesan el cuerpo del cometa y al instante se llevan algo de esa materia al alejarse del Sol». Así se formaba la cola según él. Estas afirmaciones podrían, con ligeras modificaciones, intercalarse en algún tratado divulgativo de astronomía actualmente. El mérito de Kepler, en el caso de los cometas, es que él se oponía a la aristotélica aseveración de que eran fenómenos atmosféricos, pertenecientes al mundo sublunar. Él los consideraba más lejanos, pero sin llegar a situarlos en la esfera de las estrellas fijas.

Aunque esto no fuera así, se aprecia en esta frase que atribuía a los cometas una distancia semejante a la de los planetas, sin especificar dónde «retozaban». Hoy sabemos que «retozan» en los confines del sistema solar, aproximadamente a un año-luz de distancia, en lo que se llama la Nube de Oort, llamada así por el astrónomo Jan Hendrik Oort (1900-1992).

CAPÍTULO 4

Repercusión en la ciencia actual

La astronomía de Kepler tiene hoy incontables aplicaciones, no solo indirectas, como pionero de la óptica y de la gravitación, sino muy directas, especialmente debidas a sus tres leyes, inicialmente dedicadas al movimiento planetario, pero aplicables a todos los astros. En las partes externas de las galaxias parece no cumplirse la tercera ley, pero como esto es imposible, se suele proponer que las galaxias están inmersas en un gran halo de materia oscura. Asistimos así al nacimiento de una de las hipótesis más fascinantes de la cosmología actual: la existencia de materia oscura.

Las obras de una vida fructífera no solo dependen de la voluntad y del talento, sino de las circunstancias en las que se hicieron. Esta regla evidente no debió de cumplirse con Johannes Kepler, a quien abandonamos en sus últimos días en Linz. Se marchó de esta ciudad porque los desórdenes bélicos eran inaguantables. Ni la guerra más horrísona podía hacerle perder la concentración en el estudio. Recuérdese que seguía trabajando con absoluta perseverancia cuando la guerra se estaba desarrollando ¡en su propia casa! Esto no es una metáfora ni ninguna figura retórica. La guerra la tenía Kepler materialmente en su propia alcoba. ¿Qué guerra era esa?

La Contrarreforma se había apoderado de la región con la expulsión de todos aquellos que no aceptaran la religión católica, había exigido la entrega de todos los libros considerados heréticos y había cercenado la libertad de la población. La presión llegó a ser tal que los campesinos acabaron rebelándose, se hicieron fuertes y llegaron a sitiar Linz.

La ciudad de Linz le había procurado a Kepler una hermosa vivienda. Estaba sobre la muralla y desde ella se observaba toda la planicie en su entorno. Pero cuando dio comienzo la batalla entre campesinos y tropas imperiales, resultó que su casa era un lugar idóneo para observar las maniobras del enemigo y para defenderse de él. Una compañía entera ocupó su casa. Tenían que

tener la puerta siempre abierta para que la compañía se defendiera, saliendo y entrando, día y noche. Los militares disparaban desde su casa, con lo cual no dejaban dormir a sus moradores durante la noche ni vivir durante el día. En una habitación, con el sonido ensordecedor de los tiros que iban y venían, Kepler seguía trabajando...

Tenía muchas cosas en que pensar, muchas que escribir y muchas que mandar a la imprenta. Esto último no pudo hacerlo porque la imprenta de Linz, de Herr Plank, fue incendiada en aquellas revueltas. Ya sabemos que en 1627 Kepler abandonó Linz, dejando a su familia en Ratisbona, para trasladarse a Ulm, donde podía vigilar personalmente la impresión de las *Tablas rudolfinas*.

Pero, una vez acabada la impresión de la obra, ¿dónde podía ir la extensa familia Kepler? Repudiado por sus hermanos luteranos, bienvenido a la religión que él repudiaba, no tenía adónde ir. Las luchas intestinas entre calvinistas, luteranos y católicos, además de otras varias ramificaciones doctrinales, atenazaban a toda la Europa central, en una guerra que había de durar treinta años. Kepler se encontró sin patria y sin destino. Pedía poco, pero ese poco era mucho pedir.

Por de pronto se dirigió a Praga, a entregar al emperador las *Tablas rudolfinas*. El emperador se lo había encargado y a él tenía que entregarle el gran legado, destilado último de la vida de Brahe y de la suya propia, aunque seguramente le recibirían en la corte con inquina y desprecio: el emperador había expulsado definitivamente a todos los no católicos.

No le recibieron mal, sino con toda amabilidad y admiración. El emperador personalmente lo colmó de distinciones y le mostró su sincero respeto. Pero al poco tiempo de estar en la corte se vio gentilmente estimulado a abrazar la religión católica (hay que señalar que Kepler no seguía las mismas denominaciones que todos los demás; católicos para él eran todos los cristianos, la Reforma, la Contrarreforma, el calvinismo, los anglicanos, los hugonotes, etc. A los que otros llamaban católicos, para él eran papistas).

¿Qué había que hacer para que Kepler se pasara al bando católico? La fuerza, la expulsión, las amenazas eran inútiles. Había





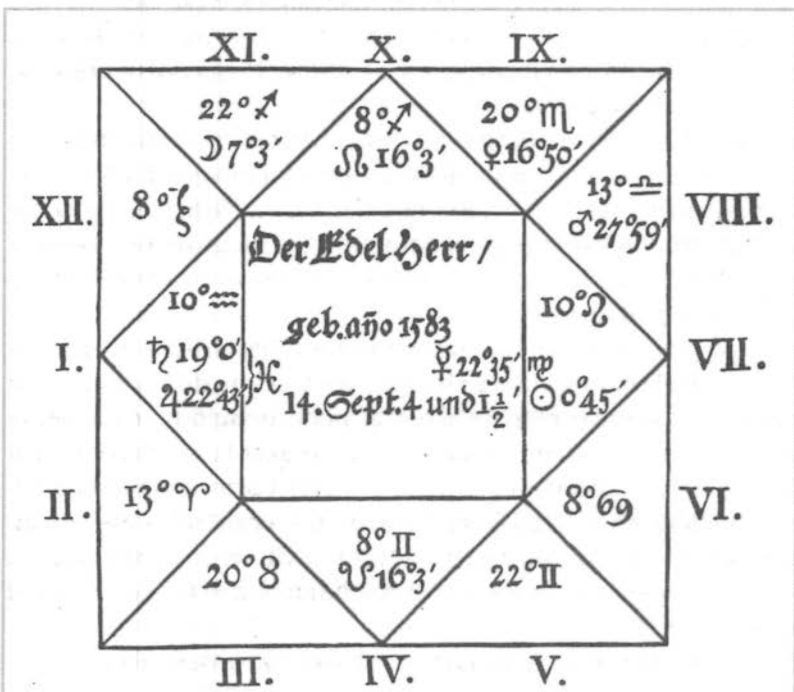


FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Grabado de Pieter de Jode el Joven que representa a Albrecht von Wallenstein, general que acogió a Kepler en el palacio de Zagan.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Johannes Kepler, en un retrato de autor desconocido pintado en 1620.

FOTO INFERIOR:
Uno de los muchos horóscopos que Kepler realizó para el célebre y poderoso Wallenstein, un militar sumamente supersticioso que no iniciaba ninguna acción importante en su vida sin consultar a los astros.

que convencerle por medio de la razón. A pesar de su credo intransigente, Kepler nunca había renunciado a la discusión sosegada, de forma que tenía buenas relaciones, incluso de amistad, con algunos jesuitas, especialmente con el padre Paul Guldin (1577-1643), con quien había mantenido correspondencia epistolar y se encontraba por entonces también en Praga. A este culto jesuita se le encomendó ganar a Kepler para la causa católica.

Kepler, paradójicamente, quería la unión de todos los cristianos pero no renunciaba a sus convicciones, incluso hasta los más insignificantes detalles. Se empecinó en ellas y no quiso dar su brazo a torcer. Las dotes persuasivas y retóricas del padre Guldin se estrellaron contra un muro. Así que finalmente tuvo que abandonar Praga y cualquier otra posesión católica del imperio.

Siempre se ensalza la lealtad de los hombres, pero en el caso de Kepler ¿podía entenderse que sacrificara su futuro y el de su familia por cuestiones tales como la ubicuidad de Jesucristo o si la comunión se tenía que hacer con una especie o con dos? El caso es que no quiso ceder, ni con unos ni con otros, a pesar de la buena voluntad del emperador y de sus buenos amigos jesuitas. Fueron generosos, después de todo: allí adonde fuese, conservaría su cargo de Matemático Imperial y su salario. Tampoco de Linz le habían suprimido su cargo de Matemático Territorial. Pero, ¿por cuánto tiempo si él se asía firmemente a sus creencias y no se «adaptaba»? Y los suyos, los luteranos, seguían segregándolo y negándole la comunión.

En la ciudad de Praga tuvo un feliz encuentro: Wallenstein. Este general había tenido grandes éxitos militares al haber derrotado y mantenido a raya a ejércitos suecos, daneses y franceses que pretendían aprovechar la confusión administrativa del imperio, de manera que era considerado el hombre más brillante y poderoso de la corte imperial.

Wallenstein era tremendamente supersticioso y creía a pie juntillas todas las adivinaciones astrológicas, de forma que no dudó en buscar la amistad y el asesoramiento del más famoso de los astrólogos del imperio: Johannes Kepler. Anteriormente, Kepler había realizado ya un horóscopo anónimo para un joven Wallenstein, encargado por un intermediario y a cambio de una

buena suma. Es más que probable que el anonimato no lo fuera tanto y que Kepler supiera a quién estaba pronosticando el futuro. El caso es que, en opinión de Wallenstein, había acertado plenamente. El general, que consultaba con los astrólogos cada momento de su vida y cada batalla que acometía, decidió proteger a Kepler y mantenerlo a su disposición.

Wallenstein había recibido del emperador, como recompensa por sus triunfos, el ducado de Zagan (o Sagan), en Silesia (Polonia), a unos 160 km al norte de Praga. El general no comulgaba con ningún credo religioso; era un hombre de acción a quien le importaba bien poco la teología. Y la luterana Zagan estaba demasiado al norte, ignorante de las luchas religiosas que se estaban produciendo en el sur. Convenció al astrólogo y a las autoridades de Zagan, ofreció al primero un buen salario y, además, Kepler regiría su propia imprenta en la ciudad que le acogía. Así que allí fue la familia Kepler en 1628. Johannes recibía su salario con normalidad, por lo que no tenía queja en ese sentido.

Pero Zagan no fue el paraíso. La ciudad no tenía ambiente científico ni cultural y Kepler ni entendía su dialecto ni podía usar el latín. Pero lo peor fue que hasta allí también llegó la Contrarreforma con las mismas exigencias que Kepler conocía bien de Graz, Linz y Praga.

Dejemos transitoriamente de ocuparnos de su vida y volvamos a su ciencia, analizando las consecuencias de sus teorías, especialmente en la astrofísica actual.

LAS LEYES DE KEPLER EN EL SISTEMA SOLAR

Analicemos las consecuencias de las leyes de Kepler, tanto en la interpretación de fenómenos astronómicos clásicos como en astrofísicos recientes, empezando por algunas curiosidades en el sistema solar. Todos los planetas tienen una órbita elíptica, como se refleja en la tabla siguiente, que muestra las excentricidades de las órbitas con respecto al Sol, salvo la de la Luna, calculada con respecto a la Tierra.

Planeta	Excentricidad
Mercurio	0,206
Venus	0,007
Tierra	0,017
Marte	0,093
Júpiter	0,048
Saturno	0,056
Urano	0,047
Neptuno	0,009
Luna	0,055

En esta tabla no hemos incluido Plutón. Si lo hubiéramos hecho, habríamos visto su gran excentricidad, de 0,25. Debido a este alto valor, a lo largo de su año sidéreo de 247,7 años terrestres, en ciertos intervalos de tiempo está más cerca del Sol que Neptuno. Así lo estuvo desde 1978 hasta 2000. Como vimos, la excentricidad, *e*, se calcula con la fórmula:

$$e=\sqrt{1-\left(\frac{b}{a}\right)^2},$$

siendo *a* el semieje mayor (la mayor distancia desde el centro) y *b* el semieje menor (la menor distancia desde el centro).

LA LIBRACIÓN DE LA LUNA

La Luna tiene una acusada excentricidad, como vemos. Debido a ello, no tiene una velocidad de traslación constante. Esto fue descubierto, o calculado con muy buena precisión, por el astrónomo babilónico Kidinnu en el siglo IV a.C. La distancia a la Luna varía desde 406 700 km hasta 356 400 km, por lo que su tamaño angular varía entre 29' 22" y 33' 31". Esto origina una velocidad de giro variable en torno a la Tierra, que da lugar a lo que se llama *movimiento de libración de la Luna*, que explicamos someramente. El perigeo de la Luna viene a tener lugar por enero, cuando la Luna se ve más grande,

lo cual es apreciado por los amantes de la naturaleza; y por los amantes sin más («La luna de enero y el amor primero», dice el refrán).

La Luna siempre da la misma cara a la Tierra. Esto se debe a que el período de su movimiento de traslación alrededor de la Tierra coincide con su movimiento de rotación sobre sí misma. Esta exactitud no puede ser una casualidad, especialmente si se tiene en cuenta que la mayoría de los satélites del sistema solar tienen este sincronismo con su planeta. Se debe a las mareas. Las mareas están creadas por gravitación diferencial, es decir, que, por la cercanía del satélite, la gravedad ejercida por el planeta es diferente en unos puntos y en otros del satélite. Cuando la Luna era más líquida, estas mareas hacían que unas partes más cercanas a la Tierra tendieran a moverse más rápidamente que las centrales, lo que causó una fricción que fue deteniendo el movimiento de rotación. El efecto de las mareas tenía que cesar precisamente cuando el día y el mes coincidieran, es decir, cuando la Luna diera siempre la misma cara a la Tierra.

De hecho, actualmente también la Luna va frenando a la Tierra por el efecto de las mareas. Los océanos no giran a la misma velocidad que lo hacen los continentes, lo que causa ese efecto de frenado. Los días son cada vez más largos. Este aumento es tan solo de un segundo cada quinientos años, pero esa variación resulta sumamente importante en cálculos astronómicos que requieren mucha precisión. La fricción de las mareas que induce la Luna en la Tierra cesará cuando también la Tierra presente la misma cara a la Luna, es decir, cuando nuestro día equivalga a un mes. De todas formas, seguirán existiendo las mareas solares.

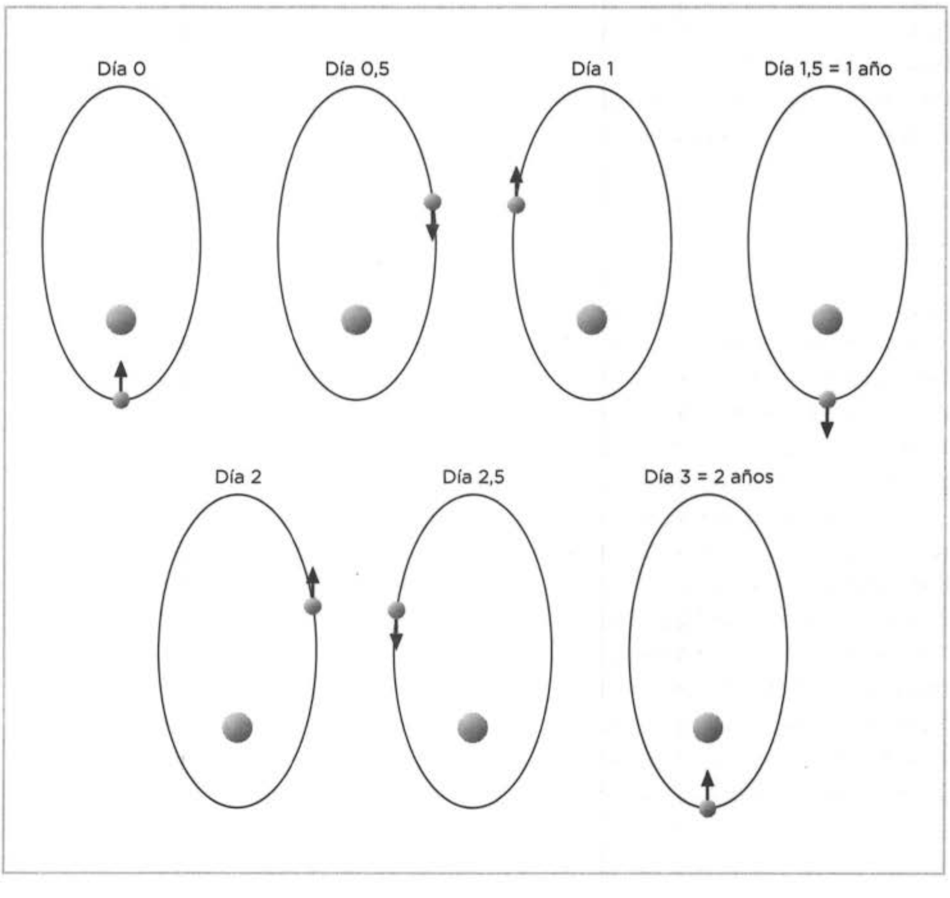
Por cierto, este aumento de la duración del día lleva asociado un movimiento de alejamiento de la Luna, por efecto de la conservación del momento cinético del sistema Tierra-Luna. Este alejamiento es de 3,8 cm/año actualmente.

Pues bien, debido a la segunda ley de Kepler, la velocidad de traslación de la Luna no es constante, mientras que su rotación sí lo es. Esto hace que la Luna parezca tener un movimiento de oscilación para un observador terrestre, que hace que en algún momento del mes podamos ver una pequeña porción de la cara oculta de la Luna, y en otro momento del mes, otra porción, por la otra parte. De hecho, no vemos la mitad de la Luna, sino el 59%.

EL DÍA DE MERCURIO

Con Mercurio respecto al Sol pasa algo parecido a lo que pasa con la Luna respecto a la Tierra. Entre los períodos de traslación y rotación no hay un sincronismo 1:1, sino un sincronismo 3:2. El año de Mercurio tiene 88 días terrestres (cosa que podemos calcular gracias a la tercera ley de Kepler), y el día, 58,65 días terrestres. Su cociente es 3/2, también debido al efecto de las mareas primitivas. El año de Mercurio dura día y medio de los suyos. Además, su órbita es extremadamente excéntrica, $e = 0{,}206$. La libración es muy

Representación del año y del día de Mercurio. La posición de la flecha indica un meridiano cualquiera. Obsérvese que este meridiano tiene la dirección antisolar al día y medio, y la dirección subsolar, a los tres días.



extrema. En el perihelio, en su ecuador, la velocidad debida a la traslación es tan rápida que, de seguir así, su año sería más corto que su día.

Como consecuencia, el Sol sale por el Este y va hacia el Oeste, como aquí, pero al mediodía se detiene y se dirige al Este; se vuelve a detener y ya se dirige hacia el Oeste definitivamente. Téngase presente que su velocidad de rotación sí es constante.

Como el sincronismo es 3:2, Mercurio no da siempre la misma cara al Sol, sino que un año está medio Mercurio iluminado y al año siguiente el otro medio. La duración del día es tan larga y la proximidad al Sol tan alta que la mitad del Mercurio expuesto al Sol alcanza una temperatura muy elevada, mientras la otra mitad es muy baja, pues como no hay atmósfera, no se equilibran ambas temperaturas. Las dos partes de Mercurio se turnan en tan satánico privilegio. En la figura de la página anterior puede verse un esquema de los días y los años.

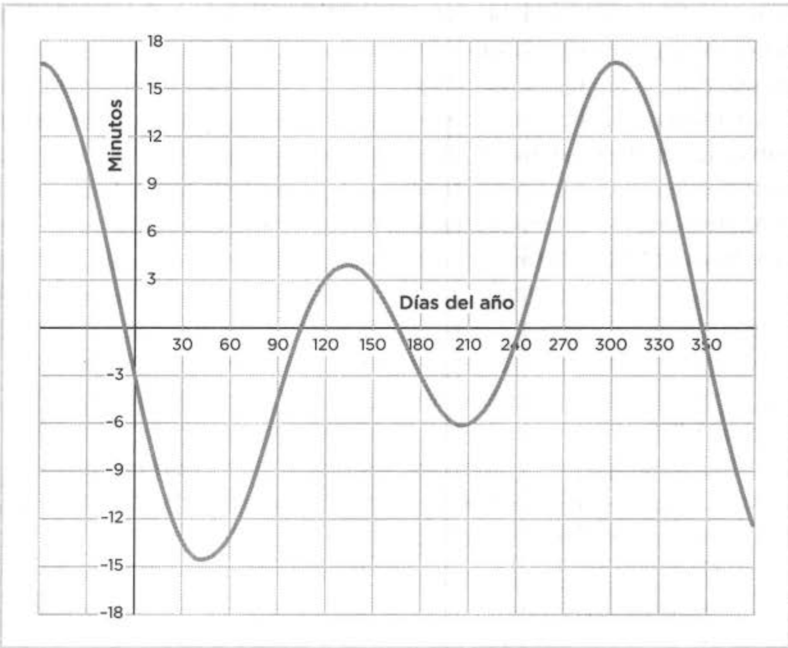
EL SOL

Según la segunda ley de Kepler, la velocidad de traslación de la Tierra alrededor del Sol no es constante. Visto desde la Tierra, creeríamos que la velocidad angular del Sol no es constante. Esto hace que el Sol, el reloj más primitivo, el que menos nos cuesta engrasar, disponible para todos, aun siendo un reloj excelente, no es perfecto: su marcha no es constante.

Un reloj solar no puede coincidir con un reloj de péndulo o un reloj atómico. Es el Sol el que falla. Para evitar esta contrariedad, nos imaginamos un Sol medio inexistente que tarde en dar una vuelta alrededor del Sol un año, exactamente lo mismo que el Sol verdadero. El Sol verdadero se adelanta a veces y otras se atrasa con respecto al Sol medio, pero ambos vuelven a coincidir al cabo de un año. Así podemos hablar de un Tiempo Solar Medio (TSM) y un Tiempo Solar Verdadero (TSV). La diferencia entre ambos se llama *ecuación del tiempo*.

$$\mathrm{ET} = \mathrm{TSM} - \mathrm{TSV}.$$

Ecuación del tiempo, debida en buena parte a la marcha irregular del Sol, consecuencia de la segunda ley de Kepler.



Cabe decir aquí que otros la definen como TSV−TSM. La ecuación del tiempo es variable, dependiendo del día del año. En la figura reproducimos la ecuación del tiempo. Este nombre puede sorprender: cuando se definió, «ecuación» tenía el significado de «corrección».

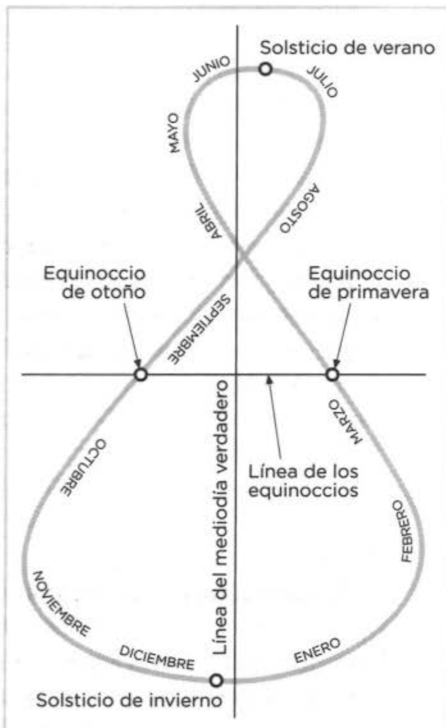
LOS COMETAS

Los cometas tienen una excentricidad extrema. Pasan cerca del Sol muy rápidos, pero su afelio está tan lejos que su velocidad en él es prácticamente nula. Por tanto, es esperable que estén todos casi parados cuando estén a una gran distancia, por lo que en ese «lugar» habrá una gran densidad de cometas. Ese lugar donde «residen» se denomina Nube de Oort y está situada a entre 50 000 y 100 000 UA. Espontáneamente, debido a alguna perturbación ocasionada por otros cuerpos celestes próximos, alguno de ellos

«cae», se va acelerando según se aproxima al Sol y, tras pasar por el cercano perihelio, se va decelerando hasta volver al lejanísimo afelio, donde la velocidad se hace de nuevo prácticamente nula. El período es, entonces, larguísimo, de forma que no lo podremos volver a ver. Estos son los llamados *cometas de largo período* y son la mayoría de ellos. Seguramente nunca antes han pasado cerca del Sol, por lo que son registros actuales de la composición primitiva del sistema solar.

EL ANALEMA

Si se representa la declinación del Sol (ángulo que forma la posición del Sol con el plano del ecuador) en función de la ecuación del tiempo durante cada día del año, se obtiene una curva en forma de ocho llamada *analema*, representada esquemáticamente en la figura. Debido a la ecuación del tiempo, no se ve solo el Sol desplazándose arriba y abajo sobre la misma línea, sino que también lo veríamos más a la derecha o a la izquierda del meridiano verdadero. En la figura, los solsticios de verano e invierno se sitúan en los puntos más alto y más bajo del analema, respectivamente. Los equinoccios de primavera y otoño se sitúan en los dos puntos donde la línea de los equinoccios corta al analema.



Representación de la ecuación del tiempo en forma de analema, tomando como referencia el meridiano verdadero del lugar.

Algunos, los menos, son *cometas de corto período*: vuelven periódicamente y se puede predecir su próxima aparición, como el Halley. Son cometas viejos y su corto período se debe a que en su primera caída, su trayectoria se vio modificada por los planetas Júpiter y Saturno, quedando así condenados a orbitar con radios heliocéntricos menores. El afelio del cometa Halley es de solo 18 UA y otros lo tienen aun menor. Su excentricidad es de 0,968, como vemos mucho mayor que la de cualquier planeta, pero pequeña comparada con un cometa de largo período, cuya excentricidad llega a ser la unidad.

> «En el aire celeste, por todas partes extendido y vacío, retozan numerosos cometas cual ballenas en el océano.»
>
> — JOHANNES KEPLER.

Los cometas pueden deshacerse en pedazos al aproximarse al Sol, sobre todo los de corto período, pues han dado muchas vueltas sometidos a la acción disgregadora del Sol. Dado que tienen una órbita muy excéntrica, podemos atravesar anualmente su antigua trayectoria, donde abundan residuos del cometa, ya difundidos por toda la órbita. Cuando la Tierra atraviesa la antigua trayectoria de un cometa muerto, se produce una lluvia de estrellas, siempre los mismos días del año, aproximadamente. Ejemplos típicos son las Leónidas (noviembre) y las Perseidas (agosto). No se producirían si la órbita hubiera tenido una excentricidad tan pequeña como los planetas.

¿ES EXACTA LA PRIMERA LEY DE KEPLER?

La respuesta a esa pregunta es que no lo es. Como es sabido, muchas fórmulas y resultados de la física clásica han sufrido correcciones relativistas. En las proximidades del Sol, el espacio-tiempo está muy curvado. En la interpretación relativista, los planetas siguen trayectorias rectilíneas en un espacio-tiempo curvo. Este

efecto será tanto más importante en las proximidades del Sol, por lo que Mercurio será el planeta más afectado por las correcciones de la relatividad general. Esta curvatura hace que la trayectoria de Mercurio se «tuerza» más de lo previsto en la mecánica de Newton, y «emerja» de la zona próxima al perihelio, avanzado con respecto a lo esperable en la descripción elíptica clásica.

El resultado neto es una trayectoria abierta. Es como una elipse pero en la cual el perihelio no está fijo. De hecho, este «avance del perihelio de Mercurio» era ya conocido antes de Einstein, pero no tenía explicación. Le Verrier (1811-1877), el astrónomo director del observatorio de París, que había predicho la existencia de Neptuno por la perturbación que producía en la órbita de Urano, explicó el avance del perihelio de Mercurio como debido a la perturbación producida por un planeta intramercurial. Lo curioso es que, dado el prestigio de Le Verrier, este supuesto planeta, al que denominó Vulcano, fue «descubierto» por un médico aficionado a la astronomía, el doctor Lescarbault (1814-1894). En la existencia de Vulcano se creyó incluso durante algunas décadas.

En el caso de Mercurio, el avance del perihelio es de 43" por siglo. Para el resto de los planetas es despreciable por estar lejos del Sol, a una distancia en la que la curvatura del espacio es ya muy débil. La relatividad general explicaba perfectamente este hecho. Precisamente Einstein propuso este efecto como una de sus tres famosas pruebas de la relatividad general.

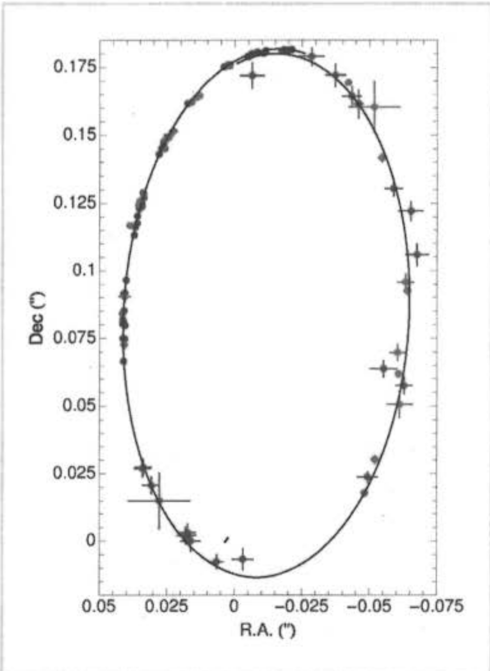
EL AGUJERO NEGRO EN EL CENTRO DE LA VÍA LÁCTEA

Los cuásares son galaxias lejanas en el centro de las cuales se cree que hay un gigantesco agujero negro del orden de 10^{10} masas solares. Pero esta propiedad no es exclusiva de los cuásares y hay «razones de peso» para sospechar que en el centro de las galaxias normales hay también un agujero negro, si bien no tan masivo. Una galaxia como la Vía Láctea puede tener un agujero negro central de unas 10^{6} masas solares.

MASA DEL AGUJERO NEGRO

Desde hace unos veinte años, existen datos de alta resolución de estrellas individuales que se mueven en torno a Sag A* (radiofuente que se considera que cubre el centro de nuestra galaxia) que permiten seguir su trayectoria. La estrella S2 ha sido seguida por un grupo del Instituto Max Planck para la Física Extraterrestre; el primer trabajo publicado por Rainer Schödel y colaboradores (2003) ya demostraba su trayectoria elíptica. Otro grupo de la Universidad de Los Ángeles llegó independientemente a la misma conclusión. Los datos más recientes de Stefan Gillessen y colaboradores (2009), del Instituto Max Planck, y de Andrea Mia Ghez y colaboradores, de la Universidad de Los Ángeles (2008), han permitido trazar la elipse completa conforme a la primera ley de Kepler, lo que permite estimar la masa del agujero negro central en 4 300 000 masas solares.

Órbita de la estrella S2 (nomenclatura alemana) o SO-2 (nomenclatura estadounidense) en torno al agujero negro, de $4{,}3\cdot10^6$ masas solares, en el centro de la Vía Láctea. Esta imagen fue publicada en *The Astrophysical Journal*. (Cortesía de S. Gillessen, American Physical Society.)



Tiene una excentricidad altísima, de 0,87. Su peri-centro-galáctico es de 17 horas-luz (3 veces la distancia Sol-Plutón) y su apo-centro-galáctico de 10 días-luz. Su velocidad máxima es de 5 000 km/s (200 veces la de la Tierra alrededor del Sol).

El radio de Schwarzschild de tal agujero negro es del orden de 10^{10} m. Siendo el radio del Sol del orden de $7\cdot10^8$ m, en él caben varias estrellas enteras.

EL DISCO DE ACRECIMIENTO

Pensemos no solo en la Vía Láctea, sino en otras galaxias semejantes en las que se supone razonablemente la existencia de

un agujero negro central. La materia no cae directamente en el agujero negro, sino que, debido a la conservación del momento cinético, al ir aproximándose al mismo va aumentando su velocidad de giro, de igual forma que el agua que va a ser tragada por el desagüe se pone a girar en torno a él hasta el punto que parece detenerse la evacuación, compensando con su giro la fuerza de atracción del desagüe. La materia que iba a acrecentar la masa del agujero negro estaba previamente en un disco galáctico muy plano. De esta forma, la materia que cae, se pone a girar en torno al agujero negro en lo que se llama un *disco de acrecimiento* (muchos prefieren llamarlo *disco de acreción*). Así que se espera que en torno a los agujeros negros galácticos haya un disco de acrecimiento.

En el disco de acrecimiento el gas gira en torno al agujero negro central. Pero no todas las partes giran con la misma velocidad angular, tal como lo enuncia la tercera ley de Kepler. Dividamos mentalmente el disco de acrecimiento en una serie indefinida de anillos muy delgados. Según la tercera ley, el período al cuadrado de estos anillos es proporcional a su distancia al agujero negro al cubo o, lo que es lo mismo, su velocidad angular al cuadrado, w, es inversamente proporcional a la distancia, r, al cubo:

$$w^2 r^3 = \text{constante.}$$

Luego no todos los anillos tienen la misma velocidad angular; un anillo se mueve más deprisa que su vecino más externo y más despacio que su vecino más interno. Se produce así un rozamiento interno, una viscosidad que calienta el disco. El calentamiento hace que el disco emita radiación observable. Este rozamiento interno, según la tercera ley de Kepler, es más intenso en las partes más internas donde el calentamiento es mayor. Las longitudes de onda más pequeñas, o sea, más energéticas, se emiten en las partes más internas, y las más largas, menos energéticas, en las más externas. Gracias a esta emisión producida por el calentamiento, debida a la viscosidad, podemos observar indirectamente el agujero negro o, más bien, el material que lo orbita antes de ser tragado por él.

LA MASA DE LAS ESTRELLAS

Ya vimos que la masa del Sol se podía calcular observando cualquiera de los planetas del sistema solar, conociendo su distancia y su período de revolución. Asimismo, podemos calcular la masa de la Tierra conociendo la distancia Tierra-Luna y su período. También podríamos recurrir a cualquiera de sus innumerables satélites artificiales. La base es simplemente la aplicación de la ley de Kepler interpretada por Newton. Con el mismo principio, basándonos en esa misma ley de Kepler, podemos calcular masas estelares siempre que se trate de estrellas dobles, es decir, de dos estrellas que giren una en torno a la otra. Este cálculo es importante porque constituye casi el único método directo de determinar masas estelares. Afortunadamente, muchas estrellas forman sistemas dobles, de forma que tenemos una buena base estadística sobre masas estelares. Se encuentra entonces que la masa de una estrella está íntimamente relacionada con su luminosidad (la energía lumínica que irradia por segundo). Esta relación masa-luminosidad es del tipo

$$L \propto M^x,$$

donde L es la luminosidad, M, la masa y x, un exponente que es aproximadamente 3 (algo mayor para estrellas muy grandes). De esta forma, posteriormente, basándonos en esta correlación, conociendo luminosidades se pueden conocer masas.

Esta relación solo es válida para estrellas «normales», pertenecientes a lo que se llama la *secuencia principal*. Las estrellas que forman parte de la secuencia principal son estrellas formadas por un gas perfecto que obtiene su energía de la fusión del hidrógeno según el proceso $4H \rightarrow He$.

Las estrellas dobles pueden ser de tres tipos: visuales, espectroscópicas o fotométricas. En las estrellas visuales, observándolas durante un largo período de tiempo —de varios años—, vemos las dos estrellas, una girando en torno a la otra, cada una siguiendo una trayectoria elíptica. Tanto en las dobles espectroscópicas, como en las fotométricas, las estrellas están tan juntas

que no podemos resolver el sistema doble, sino que solo vemos una estrella, pero sabemos que en realidad hay dos. En estos dos casos los períodos suelen ser mucho menores y su determinación no requiere tanto tiempo.

En las espectroscópicas vemos que una raya espectral tiene un desplazamiento al rojo y otro al azul, alternativa y periódicamente, correspondientes al efecto de alejamiento y acercamiento con efecto Doppler debido al movimiento orbital. De esta forma determinamos muy bien el período.

En las dobles fotométricas observamos una variación de la curva de luz (flujo luminoso frente a tiempo), debido a que las dos estrellas se eclipsan mutuamente. Para ello tiene que ocurrir que el plano de la órbita contenga más o menos la línea de visión.

La información que se puede extraer de estos sistemas dobles es diferente según el tipo observacional. El cálculo es ligeramente más complejo que en el caso de un simple planeta, pero el principio es el mismo. Prescindimos de detallar las fórmulas que nos permiten la determinación directa de masas y pasamos directamente a proporcionar los resultados esperables. En las estrellas dobles visuales, observamos las dos elipses de las dos estrellas y podemos determinar la masa de las dos estrellas. El resultado es el mostrado a continuación:

$$M_1 = \frac{4\pi^2}{G}\frac{A^2 A_2}{\tau^2}$$

$$M_2 = \frac{4\pi^2}{G}\frac{A^2 A_1}{\tau^2},$$

donde A_1 es el semieje mayor de la estrella 1, y A_2 el de la estrella 2. M_1 y M_2 son sus masas. $A = A_1 + A_2$ es la distancia entre ambas estrellas y τ el período. Estas ecuaciones se obtienen sin más que considerar las leyes de Kepler y el hecho de que

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{M_2}{M_1},$$

puesto que el centro de gravedad ha de estar más cerca de la estrella más masiva. En el caso de que 2 sea un planeta, $M_2 << M_1$, con lo que A_1 es despreciable. Entonces A es aproximadamente igual a A_2 y obtenemos la ley de Kepler, tal como la vimos:

$$A_2^3 / \tau^2 = \frac{GM_1}{4\pi^2}.$$

Esto puede ser muy importante en el caso de que no veamos la estrella más masiva, por ejemplo porque sea un agujero negro. Aun así, podríamos calcular su masa aunque no la veamos. Así es como se pudo calcular la masa del agujero negro central de la Vía Láctea.

En el caso de las binarias espectroscópicas solo podemos calcular las masas multiplicadas por el factor desconocido sen i, siendo i la inclinación de la órbita, o ángulo formado por el plano de la órbita y el plano del cielo. El plano del cielo es el perpendicular a la línea de visión.

La información es especialmente abundante cuando las binarias son a la vez espectroscópicas y fotométricas. Entonces conocemos la inclinación de la órbita, pues para que se produzcan eclipses i debe estar cerca de 90°. En este caso no solo podemos conocer las dos masas, sino además su distancia y los radios de las dos estrellas.

El Sol tampoco está fijo, sino que, debido a la atracción de los planetas, especialmente de Júpiter, describe también un pequeño círculo. El radio de este círculo es aproximadamente igual al diámetro del Sol, de forma que se mueve en torno a un eje que parece situado aproximadamente en su superficie. Observando este pequeño movimiento, podríamos deducir la existencia de Júpiter, aunque no fuera visible.

Este hecho se puede aprovechar, y se aprovecha, para detectar otros sistemas planetarios no solares. No solo por el desplazamiento lateral, difícil de apreciar, sino porque este movimiento circular (o más bien elíptico) puede observarse gracias al efecto Doppler. Con este procedimiento y algunos otros complementarios se han podido detectar numerosos sistemas planetarios extrasolares.

LA MATERIA OSCURA DEL UNIVERSO

Los familiares protones y neutrones son partículas del tipo llamado *bariones*. Se piensa hoy que además de esta materia «ordinaria», esta materia bariónica, el universo contiene otros componentes más exóticos, como son la materia oscura no bariónica y la energía oscura. La materia bariónica no es más del 4%, la materia oscura puede representar el 21%, y la energía oscura, el 75%. Así pues, la materia que vemos, u observamos con nuestros telescopios, no es más que una pequeña parte de lo que realmente llena el universo. A esta conclusión se ha llegado por una serie de observaciones, como son las anisotropías del CMB (*Cosmic Microwave Background*, Fondo Cósmico de Microondas), la re-aceleración del universo, la curva de rotación de las galaxias espirales y algunas otras más.

¿Qué tiene que ver esto con las leyes de Kepler? La materia oscura se detectó originalmente en los cúmulos de galaxias, pero una de las pruebas más reconocidas como demostrativas de la existencia de materia oscura es la curva de rotación de las galaxias espirales: las galaxias giran «demasiado deprisa». Si su gravitación fuera creada por la masa estelar y el gas que observamos, no podría retener la materia que gira a tanta velocidad en la periferia, es decir, la gran fuerza centrífuga no podría ser equilibrada con la gravitación que crea la materia visible.

Volvamos a las fórmulas expuestas en el capítulo 2. Supongamos que la autogravitación se compense con la fuerza centrífuga:

$$\frac{GM}{r^2}=\frac{\theta^2}{r}.$$

Esta es la fórmula que nos conduce a la tercera ley de Kepler. No podemos aplicarla ahora porque estamos utilizando una expresión de la fuerza de gravedad válida únicamente para la creada por una masa puntual central. Este era el caso del Sol, prácticamente puntual en comparación con las dimensiones del sistema solar. Pero en una galaxia la materia está mucho más uniformemente repartida por toda ella.

Sin embargo, al analizar la periferia de una galaxia, se puede aproximar toda su masa como concentrada en un punto central. Es decir, la fórmula anterior sería válida en la periferia y solo en ella. Dicha fórmula nos dice:

$$\theta = \sqrt{GM}\, r^{-1/2}.$$

A esta curva de rotación, esperable en la periferia, se le llama precisamente *curva de rotación kepleriana*.

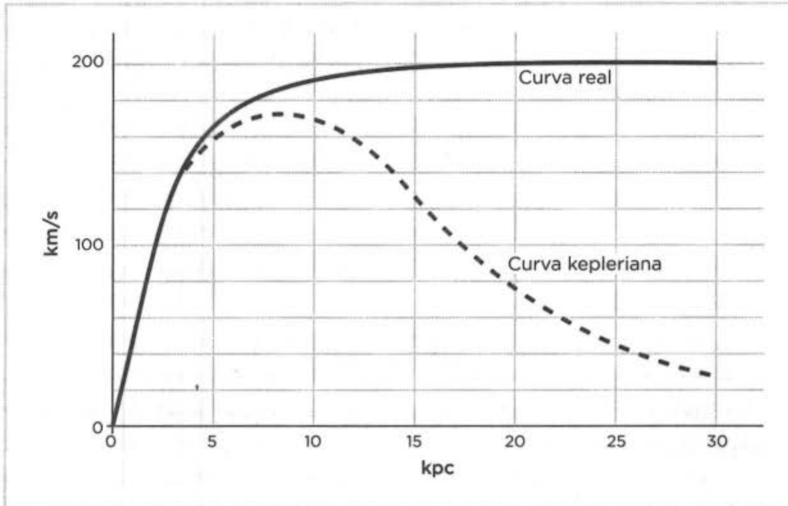
Sin embargo, lo que se observa no es esto, sino una rotación plana, es decir, en la periferia la velocidad de rotación es constante, se hace independiente de la distancia (véase la figura de la página siguiente). Por tanto, a tenor de lo expuesto, las galaxias parecen desobedecer la tercera ley de Kepler. ¿Cómo es posible? Este es precisamente uno de los grandes interrogantes de la cosmología actual. Si la periferia de las galaxias espirales obedeciera la fórmula anterior, que predice que:

$$\theta \propto r^{-1/2},$$

podríamos calcular fácilmente la masa de la galaxia, pero como no la obedece, no puede conocerse. Es más, si en la primera fórmula hacemos que θ sea constante, la igualdad es imposible: el primer miembro de la ecuación depende de r^{-2} mientras que el segundo depende de r^{-1}.

¿Cómo es posible salir de esta paradoja a la que nos conduce la tercera ley de Kepler? La explicación más admitida es que en las galaxias hay una gran cantidad de materia oscura, que no puede verse, pero que sí crea gravitación. Esta materia oscura estaría en un halo, el halo de materia oscura, con una distribución prácticamente esférica, y mucho más extendida que la materia visible del disco de la galaxia espiral. Al estar tan extendida ya no podríamos decir que estamos observando la periferia, y sería de esperar que la caída kepleriana se produjera a distancias mucho mayores, donde ya no se dispone de observaciones (véase la figura).

No se sabe con certeza la cantidad de masa de una galaxia porque no conocemos la cantidad de masa oscura que contiene.



Curva de rotación de una galaxia espiral típica. Para radios pequeños, esta curva no sigue la rotación kepleriana, porque la gravitación no es la creada por un cuerpo puntual central. Pero para radios grandes, la curva real debería mostrar un decrecimiento kepleriano; sin embargo, no decrece y se mantiene constante. Se cree que ello se debe a la existencia de un halo hipotético de materia oscura, muy masivo y extendido.

Las estimaciones indican que la materia del halo oscuro galáctico puede ser diez veces más que la visible y puede estar diez veces más extendida.

Existen otras teorías para explicar la curva de rotación alta y plana de una galaxia espiral. Una de ellas supone que, o bien la fórmula de la gravitación de Newton es incorrecta, o bien que lo es la conocida expresión del segundo principio de Newton $F = m\ a$. En ambos casos no se cumpliría la tercera ley de Kepler, que pasaría a ser correcta para el sistema solar, pero no para las grandes dimensiones y ligeras aceleraciones presentes en la periferia de una galaxia. Esta teoría se denomina *MOND* (de *MOdified Newtonian Dynamics*). Otras teorías suponen la existencia de otras fuerzas, además de la gravitatoria, en la dinámica de una galaxia, como puede ser la fuerza magnética.

LA GRAVEDAD DE KEPLER Y LAS MANCHAS SOLARES

No, en efecto, no debemos a Kepler ninguna primera teoría de la gravedad, la que hay que atribuir indiscutiblemente a Newton.

Pero las reflexiones de Kepler fueron un interesante antecedente. No es solo que las leyes de Kepler le abrieran las puertas a Newton, sino que se metieron hasta la cocina.

Como hemos visto, fue Kepler quien dijo que el Sol ejercía una fuerza, similar a la magnética de Gilbert, que se iba perdiendo con la distancia de la misma forma que lo hace el flujo luminoso (según $1/r^2$). Hay que hacer hincapié en ello porque esta imagen es completamente novedosa e irrumpe de manera revolucionaria en la historia de la física.

¿Cuál era la propiedad de un cuerpo como el Sol, o como la Tierra, que desencadenaba esta fuerza? En la dinámica de Newton, es la masa. En cambio, Kepler lo atribuía (hoy pensamos que erróneamente) a algo relacionado con el giro. Así que él «sabía», o por lo menos lo predecía con sus razonamientos iluminados, que el Sol giraba. Cuando Galileo vio que las manchas del Sol indicaban que, efectivamente, este giraba, no le sorprendió, aunque lo consideró una prueba concluyente de su teoría de lo que hoy podríamos llamar la «gravitación engendrada por el giro».

¿Quién descubrió las manchas solares y su movimiento? Seguramente fueron los astrónomos chinos pero, para el mundo occidental, este descubrimiento suele atribuirse a Galileo, aunque pudo haber otros que le precedieran. Lo cierto es que el mismo Kepler, si no el primero, solo dos años después de la publicación de Galileo, observó las manchas mediante un procedimiento digno de ser recordado. Como también hemos dicho, Kepler era muy aficionado a practicar un agujero en un cartón y observar la imagen invertida en una pantalla situada en la parte posterior.

En el caso al que nos referimos, este agujero existía, aunque no fuera el mismo Kepler el autor de la perforación. En uno de sus viajes a Ratisbona, mientras visitaba su magnífica catedral, se percató de que algunos agujeros en las vidrieras hacían el mismo efecto que el agujero del cartón, y las imágenes se proyectaban en la pared de enfrente del interior del templo. Allí vio Kepler la imagen del Sol invertida, allí identificó las manchas solares y allí reconoció su movimiento. Podemos imaginarlo ilusionado y nervioso, llamando la atención de devotos o visitantes sobre el inesperado instrumento de observación astronómica.

El Sol —pensaba probablemente Kepler— gira, y esa capacidad de giro se transmite por el espacio, debilitándose según el inverso del cuadrado de la distancia. De ahí a la gravitación de Newton había un gran paso, tan grande que solo la gran zancada del genio inglés podía superar, pero, aun así, algo debieron de inspirarle las osadas elucubraciones de Kepler, si es que aquel pudo encontrarlas en el montón de papeles escritos por este. La gravedad seguiría entonces un largo camino, pasando por Newton y Einstein, camino que está aún lejos de haber llegado a su destino final.

> «Afortunado de mí, porque he sido el primero de este siglo en contemplar las manchas.»
>
> — **Kepler, tras descubrir las manchas solares.**

Según la física actual ¿es desatinado pensar que el giro produce gravedad? No lo es, puesto que la curvatura del espaciotiempo está creada no solo por la masa, sino por el momento y la energía que entran en un tensor, llamado *tensor impulso-energía*, responsable de la curvatura y en definitiva de la gravitación. El giro supone un momento y, por tanto, crea curvatura, crea gravedad. Claro que es difícil buscar una conexión entre las ideas de Kepler y estas ideas de Einstein, aunque admiramos su intuición previsora de ideas futuras.

En 1607, un hombre observaba la trayectoria de Mercurio próximo a la conjunción con el Sol. Tras una oscura tormenta, el Sol reapareció de pronto y pudo observar sus rayos por unas rendijas de la casa. Este hombre colocó un papel blanco tras una de tales rendijas, y en el papel se dibujó la imagen invertida del Sol. En esta imagen se apreciaba «un pequeño puntito casi negro, semejante a una pulga enjuta». Estaba con un amigo y ambos quedaron impresionados por la diminuta mancha. No era una imperfección del papel, como comprobaron moviéndolo. Tenía que ser ¡el tránsito de Mercurio!, fenómeno difícil de observar, por su rareza y por el pequeño diámetro de dicho planeta. Mercurio estaba atravesando el disco solar. La noticia fue llevada al empera-

dor. El oficial de su relojero, gracias a un orificio en una chapa, también lo observó y lo certificó:

> Heinrich Stolle, oficial menor de relojero, de mi puño y letra: Cuando las nubes desaparecían, se veía que habían pasado por encima del puntito, pero el puntito seguía estando en la luz, aunque las nubes hubieran discurrido sobre él.

¿Quién podría ser aquel hombre que colocó el papel blanco interceptando el rayo de luz que se filtraba por el orificio de la pared? ¿Quién fue raudo a comunicarlo al palacio del emperador? Era... Johannes Kepler.

Pero lo que había visto no era el tránsito de Mercurio, sino una descomunal mancha solar, como él mismo comprobó después. Afortunadamente, estaba con su amigo Martin Bachazek, con mucha mejor vista que Kepler, para cerciorarse de que el puntito negro no era el fruto de sus ojos torpes. Así pues, quien descubrió las manchas solares (para la cultura occidental) realmente fue Kepler. No fue Galileo, ni Fabricius, ni ningún otro, ya que el descubrimiento de las manchas fue objeto de disputas de prioridad. Fue Kepler, aunque interpretara erróneamente lo que estaba observando.

KEPLER Y LA ENTROPÍA

La termodinámica enseña que hay una direccionalidad temporal en los procesos. Hay una magnitud física, denominada *entropía*, que siempre aumenta en los procesos reales. Hay sucesos «irreversibles», en los que la entropía del universo aumenta, que no se dan en la naturaleza por ser extraordinariamente improbables. Así, nadie ha visto que espontáneamente se enfríe un poco el suelo y una piedra salte a nuestra mano.

Kepler no fue precursor de la termodinámica ni tuvo ninguna idea en su cabeza que pueda hoy considerarse como avanzadilla del concepto de entropía, ni aquí se pretende sugerir tal cosa.

Dicho esto, como el concepto de entropía y el concepto de irreversibilidad acaban siendo tan intuitivos y tan profundos, es raro que algún gran pensador no haya tenido reflexiones que vislumbren estas ideas tan importantes en la interpretación de la evolución del universo. En este caso, reproduzcamos una cita deliciosa recordada por Vidal González Sánchez y Nicolás García Herrera en su breve pero excelente introducción al libro *Sobre la estrella nueva*, traducido por ellos mismos. He aquí la hermosa anécdota según nos la cuenta el propio Kepler:

> Ayer precisamente mientras estaba ya cansado de tanto escribir, y dándole vueltas en mi cabeza a todo lo de los átomos que vuelan por el aire, fui llamado para ir a cenar. Mi esposa, de la que antes hice mención, pone sobre la mesa delante de mí una ensalada de verduras aliñadas con sal, aceite y vinagre. Así que, dije yo, si una vez lanzados y volando por el aire todas esas cosas, los platos de estaño, las hojas de lechuga, todos los granitos de sal, las gotas de agua, de aceite, los trozos en que se han partido los huevos cocidos y este volar estuviera sucediendo desde toda la eternidad, ¿es posible que en un momento futuro, cuando quiera que sea, todo esto se colocara nuevamente tal y como ahora está en la fuente ensaladera?

Lo mejor y la más termológica sentencia fue la de su mujer, Barbara: «Respondió mi bella esposa: "Pero jamás con esta elegancia ni con este orden"».

CAPÍTULO 5

El escritor

¿Cómo vería el mundo un observador en la Luna? Un científico imaginativo como Kepler, que siempre ponía algo de literatura en sus escritos científicos, tenía que acabar haciendo literatura pura, aunque en esta incursión literaria pusiera algo de ciencia. Y así apareció lo que puede considerarse la primera obra de ficción científica. Su protagonista, Duracoto, no es otro que el mismo Kepler. Con esta obra, de la forma más imperceptible y amable, convenció al mundo de la verdad del heliocentrismo.

Desde niño gustó Kepler de anagramas y paradojas del lenguaje y desde muy joven se sintió atraído por la métrica de los versos latinos. De hecho, a lo largo de su vida, escribió versos de perfecto respeto al metro y a la consonancia, algo simples, quizá, en cuanto a valor literario, aunque esto siempre sea discutible. Así, escribió una elegía para el sepelio de Tycho Brahe, o también su *Funera domestica duo luctuosissima (Dos muertes familiares lamentabilísimas)* por la muerte de su primera esposa y uno de sus hijos. A modo de ejemplo, este acaba:

> No ansíes demorarte.
> Apresúrate a morir
> para adentrarte en la vida.

Su prosa es prolija, sin distinguir aspectos matemáticos, religiosos o literarios. Siempre incluye frases de belleza poética y comparaciones ingeniosas. Así, para no rechazar la astrología, a pesar de los malos astrólogos, nos recomienda que si hubiera que tirar una cuna por vieja o por mala, no habría que hacerlo con el niño dentro. O nos dice que la inmundicia puede engendrar caracoles. Tiene frecuentemente frases de fuerza dramática, como la que escribió cuando recibió la noticia de la denuncia de su madre por bruja, que le «diseminó el corazón por todo el cuerpo».

Refiriéndose al telescopio, nos lo describe con «¡Oh tú, sapientísimo tubo, más valioso que todos los cetros! ¿Acaso quien te sostiene en su diestra no ha sido elegido rey, soberano de las obras de Dios?». En otra ocasión nos dice que «estos eclipses son los ojos de los astrónomos [...] esos oscurecimientos iluminan el espíritu de los mortales [...] para alabar a las sombras».

Es claro y contundente al reclamar el mérito de sus descubrimientos, y a menudo muy duro al juzgar los que disienten de él, como con los rosacruces y cabalistas, a los que dice odiar y a los que llama «grillos silentes». El caso más impropio fue cuando en *De stella nova* arremete contra el desdichado Giordano Bruno acusándolo de haber mancillado el crédito de Copérnico y el de toda la astronomía.

Basten estos pocos ejemplos para ilustrar el gusto por la literatura que no separaba de lo que él llamaba *cupiditas speculandi* (gusto por la investigación). Pero esta inclinación artística no merecería un capítulo especial si no fuera porque es el autor de lo que se considera el primer libro de ciencia ficción de la historia.

«SOMNIUM»

Este opúsculo, que lleva por título *Somnium. De astronomia lunari (Sueño. La astronomía de la Luna)*, puede, en efecto, ser considerado la primera obra de ciencia ficción. Su intención es describir cómo vería el mundo un selenita, interesante juguete que obliga a pensar. No es nada sencillo de llevar a cabo, incluso para un astrónomo que, como nuestro Kepler, tenía una visión tan completa del universo. Y al decir que tenía una visión de cómo era el universo, conviene recordar que sus míseros ojos le proporcionaban solo una imagen distorsionada; era más bien en su cabeza donde cada astro ocupaba una posición en un momento determinado.

Su propósito era a la vez divulgativo y convincente. Quería defender el modelo copernicano demostrando que un selenita po-

dría pensar que él era el centro del universo. Y, por otra parte, al presentar este juguete en forma novelada, podía permitirse la elucubración imaginativa sin tener que dar explicaciones.

La obra es muy corta y había sido escrita mucho antes de su publicación. Esto es una obviedad, ya que fue publicada después de su muerte *(opus posthumum)*. Queremos decir que ya había circulado algún primer borrador antes de que él le diera la forma definitiva. En esta añadió notas aclaratorias con tal profusión que son más extensas que la propia obra.

Él mismo declara las fuentes en las que se inspira su relato, como son la obra de Plutarco *Sobre la cara que se ve en el disco lunar* o la de Luciano *Historia verdadera*. El mismo Giordano Bruno, en *De inmenso*, hace un viaje a la Luna para ver cómo se vería el universo desde allí. Pudo haberse inspirado en el supuesto viaje del licenciado Torralba, citado en *Don Quijote de la Mancha* de Cervantes. Pero es, en cualquier caso, una obra original, muy técnica y muy imaginativa. Es, además, una obra de suma importancia en la historia de los conceptos de la física.

Kepler tiene un sueño en el que el protagonista es islandés y tiene por nombre Duracoto. Su madre es Fiolxhilde y su padre había muerto a la edad de ciento cincuenta años, cuando él tenía solo tres, de forma que apenas lo había conocido. Ni siquiera su madre le dijo nunca su nombre:

> [Ella] cogía con muchos requilorios ciertas hierbas que cocía en casa, confeccionaba unos saquitos de pellejo de cabra, los rellenaba con el preparado y los llevaba al puerto cercano para vendérselos a los patrones de los barcos.

Por esta descripción y otras más que aparecen en la obra, se puede deducir que Fiolxhilde era bruja. De esta forma, aquellas copias preliminares que aparecieron del *Somnium* dificultaron la defensa en el caso de la acusación y encarcelamiento de la madre de Kepler, como ya dijimos.

El jovencito Duracoto abrió uno de los saquitos, por lo que Fiolxhilde no pudo venderlo. Indignada, dio a su propio hijo en venta a un patrón, que se lo llevó en su barco. Este barco, impul-

sado por vientos no previstos, tuvo que atracar en la isla de Hven, donde residía un astrónomo llamado Tycho Brahe, quien lo acogió y le enseñó astronomía. Al cabo de cinco años decidió volver a su tierra, Islandia. Allí volvió a encontrarse con su madre, muy arrepentida por haber vendido y dejado marchar a Duracoto.

Fiolxhilde se alegró mucho de que su hijo supiera astronomía, pues ella también conocía esta ciencia, aleccionada por unos demonios que la llevaban a diversos países. Duracoto quiso también vivir la experiencia de los viajes y su madre apeló a un demonio de Levania, que tal es el nombre de la Luna en la novela. Este le describió cómo hacían los viajes a Levania. Los momentos más duros eran los de salida y los de llegada, cuando había que impedir que los humanos transportados chocaran contra la superficie de Levania.

No todos los humanos eran capaces de soportar el viaje. Preferían a las viejas resecas, puesto que desde pequeñas estaban acostumbradas a volar montadas sobre cabrones, o en mantos raídos a modo de alfombras mágicas. «Los alemanes no se prestan nada para tales viajes; en cambio no rechazamos a los españoles con sus cuerpos resecos.» En una de sus notas aclara Kepler:

> Alemania se lleva la palma de la corpulencia y la glotonería, tal como España se lleva la del talento, el buen juicio y la frugalidad. Así pues, en las ciencias sutiles, como esta de la astronomía (y sobre todo la lunar, basada en una perspectiva extraña, como si alguien lo viera todo desde la Luna), si por igual se empeñaran alemanes y españoles, estos últimos irían muy por delante de los otros. Y en consecuencia dejo dicho que esta obrita habrá de dar risa a los alemanes, mientras que le han de tener cierta estima los españoles.

El viaje a Levania dura cuatro horas, aunque este astro está a cincuenta mil millas alemanas (una milla alemana es equivalente a 7,4 kilómetros; la cifra que da Kepler en números redondos está muy bien). Duracoto es así transportado por los poderes demoníacos, llega a Levania y empieza la descripción del firmamento desde un observador situado allí. Esta descripción es ma-

gistral y nos limitaremos a comentar lo más simple, ya que Kepler nos habla de numerosos detalles técnicos, incluso de la precesión de la Luna.

LA ASTRONOMÍA DESDE LA LUNA

Desde la Luna se ve Volva (es decir, la Tierra en la novela). Mejor dicho, solo los habitantes de un hemisferio ven Volva. Este hemisferio lunar se llama Subvolva. Los del otro hemisferio lunar, que se llama Privolva, no la ven nunca. Subvolva y Privolva están separados por un círculo máximo que se llama «divisor», que pasa por los polos de Levania. Los habitantes de ambos hemisferios ven las mismas estrellas fijas, tal como las vemos nosotros. En cambio, observan que los planetas siguen movimientos más complicados.

Su día con su noche dura un mes, por lo que pasan de tener un día muy caliente a una noche muy fría; este contraste es más acusado en Privolva. La longitud del día y de la noche apenas tiene variaciones estacionales; se puede decir que la sucesión de las estaciones es inexistente allí.

Los habitantes de Subvolva tienen ciertos privilegios: para ellos Volva está inmutable en el cielo, como clavada y fija. Así, no tienen problema para determinar la longitud de una localidad, como la tienen los terrestres. Sabido es que, por entonces, en la Tierra, a principios del siglo XVII, no se determinaba bien la longitud de un lugar, por la inexistencia de relojes transportables. El rey de España había anunciado un premio a quien resolviera el problema de las longitudes. Kepler alude al pobre método de recurrir a la determinación del polo magnético. Pero en Subvolva no tienen más que observar la posición de Volva.

Los subvolvanos no necesitan reloj. Saben la hora que es (dentro de sus días de un mes de duración) observando las fases de Volva. Aun así, este método no es perfecto, pues no es un reloj con marcha regular (precisamente según la segunda ley de Kepler). Pero tienen otro reloj mucho mejor: ellos ven cómo Volva da vuel-

tas con toda regularidad, de modo que han aprendido a reconocer los rasgos geográficos que la caracterizan.

Dicen los subvolvanos que en Volva hay dos partes más oscuras (Eurasia y América), separadas por una zona brillante (océano Atlántico). La parte oscura más oriental parece un busto humano (África), que se inclina para besar la cara (España) de una muchacha (Europa) con faldas muy largas (Asia), aunque ella, con una mano atrás (Bretaña), llama a un gato (Escandinavia) en actitud de saltar. La parte más occidental (América) es como una campana (América del Sur) suspendida por una cuerda delgada (América Central)... Pues bien, estos giratorios accidentes geográficos constituyen un perfecto reloj.

Volva es cuatro veces mayor que Levania vista desde la Tierra y su superficie es, por tanto, 16 veces mayor. Los eclipses de Sol son en Levania más frecuentes y duraderos, por el gran tamaño angular de Volva.

Subvolva es más caliente que Privolva, pues Volva también calienta, aunque menos que el Sol. Cuando Volva no está iluminada en Subvolva, «la conjunción de las dos luminarias arrastra las aguas todas hacia aquel hemisferio, anegando el suelo de manera que muy poco de él aflora».

Esta frase de Kepler es de una gran importancia interpretativa: ¡nos está hablando de que el Sol y Volva están ejerciendo una atracción gravitatoria sobre las aguas de Levania! Puede ser que se refiera a un efecto de marea, pero la marea no es otra cosa que gravitación diferencial. De nuevo, vemos que el concepto de gravitación estaba latente, a punto de brotar, del incansable tintero de Kepler.

En cambio, Privolva es más frío y seco, aunque cuando es de día las aguas de Subvolva vuelven en parte a Privolva, refrescándola un poco. Con esta descripción pasa Kepler a examinar la constitución física de los levanianos, sus costumbres y la necesidad de vivir en cuevas por la larga duración del día y de la noche, aprovechando la porosidad de su planeta.

Por supuesto, y esta es la gran lección que el *Somnium* persigue, los demonios levanianos dan por supuesto que Levania es el centro del universo y que los otros planetas, además del Sol y la

propia Volva, giran en torno a ella. Es una obra corta, deliciosa, que termina cuando Kepler despierta del sueño.

LAS MUJERES DE KEPLER

No dejó Johannes mucho escrito sobre las mujeres de su vida: o bien no concedió demasiada importancia al amor humano, o bien quiso preservar su privacidad en estos asuntos. Hay escasísimas referencias anteriores a su primer matrimonio. En su autohoróscopo se lee:

> 1591. El frío trajo consigo la prolongación de la sarna. Cuando Venus pasó por la Séptima Casa, me reconcilié con Ortholphus: cuando ella regresó, se la presenté a él; cuando ella volvió por tercera vez, me debatí de nuevo, herido por el amor. El inicio del amor: 26 de abril.

Y cuando tenía veintiún años, en 1592, nos cuenta también en su autohoróscopo: «Se me ofreció la unión con una virgen; la efectué la víspera del Año Nuevo con la más terrible dificultad, experimentando los dolores más agudos de la vesícula». No hay más noticia de sus amores juveniles.

No puede decirse que se entusiasmara enormemente con su primera boda en 1597, con la joven Barbara Müller. Tenía la novia veintitrés años y, sin embargo, ya había enviudado dos veces; este sería su tercer matrimonio. Su futuro suegro era un avaro propietario de un próspero molino en la hacienda Mühleck (ha habido cierta confusión con el apellido de soltera de Barbara, Mühleck y Müller, quizá debido a que *müller* significa «molinero»). No le gustó de entrada que su hija se casara con un hombre de poca alcurnia, eufemismo con el que quería expresar que no tenía ni un florín. Pero los amigos intermediarios de Kepler fueron pertinaces y al fin lograron convencer al rico molinero.

Pero, antes de concertarse definitivamente el matrimonio, Kepler estaba en Stuttgart ocupándose de la fábrica del gran copón del mundo, con sus sólidos perfectos y órbitas planetarias

intercalados. Se le pidió que regresara pronto, pues se había fijado ya la fecha de la boda. Kepler tardó más de tres meses en volver a Graz, tanto que la novia se había cansado de esperar. Cuando llegó, ya había perdido a la novia, pero no su empleo, a pesar de que había pedido permiso para dos meses y volvió al cabo de siete. Nuevamente, los amigos enternecieron a Barbara y a su padre, y al fin Kepler se casó con ella cuando él contaba con veintiséis años de edad. La demora de su viaje de vuelta a Graz demostraba que Kepler estaba más entusiasmado con la fabricación del gran copón en la corte de Stuttgart que con su propia boda.

«Tenía un carácter estúpido, malhumorado, solitario y melancólico.»

— Kepler, acerca de su primera mujer, Barbara Müller.

También hay que decir que el hermoso caudal de la novia debió de pesar en la decisión. Kepler, tan místico en su pensamiento y en su obra, no despreciaba el dinero, aunque fuera para poder dedicarse sin trabas económicas a su intensa actividad creadora. No se quiere con esto decir que el patrimonio fue el móvil principal del matrimonio, pero sí que tuvo su influencia. Sin embargo, el padre de Barbara nunca derrochó generosidad con su hija y con su soñador yerno. «Le retuvieron su fortuna injustamente y ahora solo puede permitirse una sirvienta contrahecha», contó Kepler a Hans Georg Herwart von Hohenburg, con quien mantuvo una larga relación epistolar.

Barbara era hermosa, algo regordeta, «de mente simple y cuerpo grueso». Al principio era virtuosa, honesta y discreta. Como nos contó el propio Kepler, su matrimonio fue «más apacible que feliz, aunque dotado también de amor y delicadeza», lo cual, acostumbrados a su desnuda franqueza, nos hace pensar que la armonía de su casa no fue menor que la que buscó en el cosmos. Pero esta paz y esta delicadeza no debieron de ser muy constantes a juzgar por otros escritos en los que Kepler describe su hogar como un infierno. Fue un matrimonio con muchos problemas, no solo por la incompatibilidad de caracteres y por la

estrechez pecuniaria, sino también por la debilidad física de ambos, la muerte prematura de sus primeros hijos y las discordias religiosas que tuvieron que soportar. Según su marido, el horóscopo de Barbara anunciaba «un destino triste y desgraciado». Antes de la boda, escribió a Mästlin:

> Me veo obligado a gastar una gran suma de dinero, porque aquí es costumbre celebrar espléndidamente los matrimonios. Si, de todos modos, Dios prolonga mi vida, me veré atado y constreñido a este lugar [...] porque mi esposa posee aquí propiedades, amigos y un padre próspero; parece que al cabo de unos pocos años no necesitaré ya más salarios.

No parece que sea la misiva de un novio enamorado. El matrimonio no fue feliz. En favor de Barbara hay que decir que fuera de casa era muy agradable de trato y que dentro era una buena madre, desviviéndose por sus hijos. Pero no hubo sintonía entre ella y Johannes. A ella no le interesaba nada la astronomía. Ni sabía bien a qué se dedicaba su marido, ni entendía su concentración ni su dedicación exclusiva a los libros y a los escritos y lo interrumpía frecuentemente con problemas domésticos. No leía más que un libro de oraciones. Era iracunda con su marido, quien inicialmente sostenía la disputa hasta que aprendió a callar y a tener paciencia con ella. No sabemos cuál hubiera sido la versión de Barbara sobre tantas desavenencias domésticas.

Tenían gran ilusión por la llegada de su primer hijo, pues su horóscopo presagiaba una vida plena de éxitos. Pero el niño, ingrato con las estrellas que tan feliz destino le deparaban, murió a los dos meses. La segunda hija murió, como su hermano, de meningitis. Solo sobrevivieron dos niños, los que junto con Regina, hija de un matrimonio anterior de ella, constituyeron la primera familia de Kepler. Ella fue perdiendo la memoria y el seso y murió joven, a los treinta y siete años. Murió también el mismo año su hijo y para ambos compuso Kepler su sentida elegía.

De Barbara conocemos algunos datos por los escritos de Kepler. En cambio, de su segunda mujer, Susanna Reuttinger (1595-1635), no sabemos prácticamente nada. Kepler no la menciona

mucho en sus escritos, lo cual puede ser interpretado como desinterés o como armonía y ausencia de problemas. La armonía conyugal no mueve la pluma; el menosprecio, tampoco. Susanna era huérfana y tenía veinticuatro años cuando se celebró la boda, en 1613. Pese a su humildad y discreción, cualidades por las que no asomó a los prolijos escritos de Kepler, fue la elegida entre ¡once candidatas!

Con Susanna tuvo siete hijos, aunque tres murieron en la infancia. ¿Se portó Johannes bien con ella? No lo sabemos. Podemos juzgar indirectamente. Cuando se desplazó a Ulm en busca de impresor para las *Tablas rudolfinas*, sin tener un destino en ningún sitio, dejó a Susanna instalada en Ratisbona, con amplia prole y escaso dinero. No volvió hasta diez meses después. Pero entonces se fue a Praga, donde estuvo cinco meses. Y luego debió viajar a Linz. ¡Pobre Susanna! Kepler había rechazado ofertas para trabajar en cátedras de Italia y de Inglaterra. Él mismo pidió la cátedra de Estrasburgo, en cuya universidad incluso había colgado un retrato suyo, ¡tanto se le quería allí! y un amigo le ofrecía su propia casa, y le fue concedida su petición, pero... la rechazó porque decía que no podía hacerse cargo de los gastos del viaje (?).

Al fin, la familia pudo residir en Zagan, y ya sin pasar apuros económicos. Pero entonces fue cuando él, quizá algo trastornado, llevándose libros y mucho dinero, viajó sin que se sepa el motivo ni el destino y fue a morir a Ratisbona. Parece que sus mujeres no pudieron rivalizar con sus dos amadas féminas: Venus y la Luna.

Jakob Bartsch, el ayudante y colaborador más cercano de Kepler y que acabó casándose con Regina, se portó admirablemente bien con Susanna, procurando reunir, sin mucho éxito, el dinero que se le debía a su marido y el que debía percibir por sus últimas publicaciones. Wallenstein, en Praga, pagó los atrasos que le debía a Kepler (250 florines), pero se desentendió en lo sucesivo. En Ratisbona se unieron en la tumba de Kepler, Susanna, Bartsch y su hijastro, Ludwig Kepler, hijo de Barbara, quien aunque tampoco andaba sobrado de dinero, se portó también muy bien con ella. Susanna se mudó a Frankfurt, donde vivió en la miseria. No hubiera ocurrido así si hubiera podido cobrar todo lo que se le debía a su marido. Murió, precisamente también en Ratisbona, a la edad de cuarenta y siete años.

LA ELECCIÓN DE LA CANDIDATA



Barbara Müller, la primera esposa de Kepler. Tras su muerte, el astrónomo contrajo matrimonio con Susanna Reuttinger.

Esta selección está pormenorizadamente detallada en una carta a un noble cuya identidad se desconoce. Es una carta disparatada, que causa asombro y risa. Este estudio de las once candidatas hasta quedarse con la quinta parece que fuera fruto de un análisis frío y concienzudo. En realidad, fue más bien el fruto de su indecisión y de escuchar a todos sus amigos consejeros (aunque para luego no hacer caso a ninguno de ellos). Primero pensó que, puesto que para él había pasado ya «la cúspide de la virilidad» y tenía «una edad en que la pasión ya se ha extinguido», debía buscar una viuda, quizá una antigua amiga de Barbara. Pero esta señora tenía «mal aliento» (tal vez indicio de enfermedad interna), así que transfirió su interés «de viudas a vírgenes», analizando si casarse con una de sus hijas, que acabó pareciéndole demasiado rica y demasiado joven. La tercera candidata había dado palabra a otro hombre que se había ido con una prostituta, pero cuyo consentimiento juzgó ella necesario. La cuarta era alta, atlética, de buena reputación y buena dote. Pero apareció la quinta (Susanna) que era todo lo contrario: modesta, ahorradora y diligente. Despreció a la cuarta por la quinta; luego se arrepintió y prefirió la cuarta a la quinta, pero la cuarta se había cansado de tanta vacilación. Iba a quedarse ya con la quinta, pero su hijastra Regina creía que su padrastro debía aspirar a más en cuanto a nobleza y riqueza. Y así buscó una con estas características, la sexta, pero Kepler la vio orgullosa y temía una boda cara. La séptima era noble y guapa, al igual que la octava. Pero la indecisión de Kepler fue tal que a esta le propuso matrimonio y se arrepintió hasta en ¡siete ocasiones! La novena le pareció enferma. La décima era noble, tenía una situación desahogada y era ahorradora pero... era fea, «bajita y gruesa», no compaginando con él, «delgado, enjuto y más bien apergaminado». Tal condición tenía la undécima pero... era demasiado joven. Y al final, volvió a la quinta, a Susanna. «Habiendo agotado así los consejos de todos mis amigos, yo, en el último momento antes de partir hacia Ratisbona, volví a la quinta, le di mi palabra, y recibí la suya.» Al final Kepler eligió a la que no tenía ni rango, ni dinero, ni familia, ante el malestar de sus amigos y de Regina.

MUERTE DE KEPLER

En el capítulo anterior dejamos a Kepler y a su familia en Zagan. Vimos cómo allí cobraba al fin su salario con normalidad y no se conoce que pasara penurias económicas como las había tenido siempre en su vida, unas veces porque cobraba poco y otras porque no le pagaban lo que le habían prometido. Pero Kepler estaba descontento por el escaso ambiente cultural de la ciudad y, sobre todo, porque llegaron hasta allí las imposiciones intransigentes de la Contrarreforma. Hubo que convertir las escuelas luteranas en escuelas jesuitas; es decir, Kepler volvió a vivir esa situación que bien conocía por haberla padecido tantas veces.

Consiguió su propia imprenta, instalada en su vivienda, y mantenía contactos con Wallenstein para procurarse papel de calidad a un precio razonable. Seguía expulsado por la Iglesia luterana, tan intransigente como la papista, y se había convertido en un ser que inspiraba desconfianza en Zagan, donde era espiado de la misma forma que los pocos que no se habían convertido al catolicismo. Él mantenía su postura, fiel a la Iglesia que no le era fiel a él, que lo consideraba maldito, y al mismo tiempo, rechazando una Iglesia que sí le buscaba a él, pero que no era la suya, y siempre creyendo en la libertad de interpretación de la Biblia y alentando la fraternización de todos los cristianos. Kepler aprovechó sus influencias y su prestigio para que su colaborador Jakob Bartsch ocupara una cátedra en Estrasburgo. Allí tuvo lugar la boda, con gran regocijo popular por la fama que Kepler había adquirido. Pero él no pudo asistir por el cercano alumbramiento de su mujer.

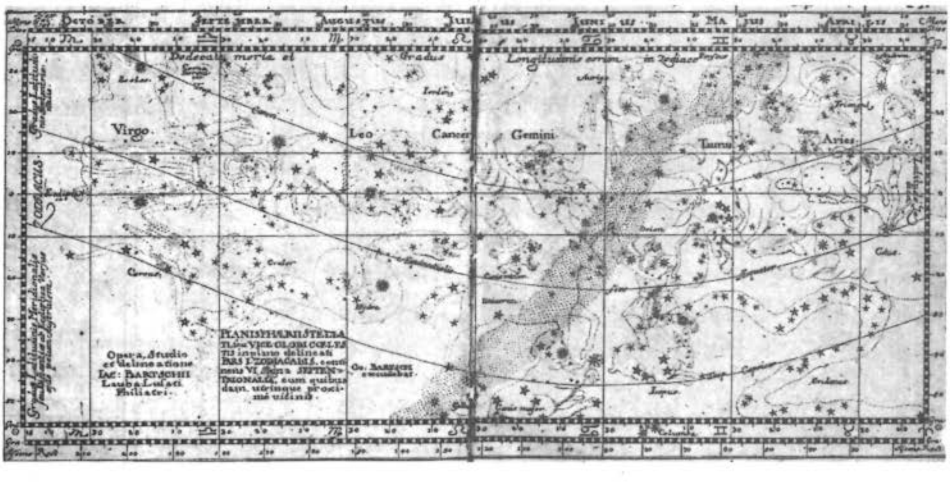
En julio de 1630 emprendió un viaje a Linz, no se sabe bien para qué. Al parecer quería cobrar un dinero que se le debía, pero no está claro, porque Kepler emprendió el viaje con libros y dinero, como si buscara un nuevo lugar donde seguir pensando. Hizo escalas en Leipzig y en Núremberg, donde contaba con buenos amigos, y en Ratisbona, la ciudad en la que había estado tantas veces y tantas veces fue albergue de su familia. Allí estaba el emperador y allí se entrevistaron.

Pero Kepler presagiaba su muerte: se dio cuenta de que la disposición de los planetas era la misma que en su nacimiento.



FOTO SUPERIOR:
Kepler murió en Ratisbona en 1630 de una extraña y repentina enfermedad. La ilustración muestra la habitación donde expiró, donde se pueden apreciar diversos efectos personales, como su testamento y su globo terráqueo.

FOTO INFERIOR:
***Planisphaerii stellati*, obra de Jakob Bartsch, el joven ayudante que acabó casándose con Regina, la hijastra de Kepler, y que tras la muerte del astrónomo alemán se encargó de defender los asuntos familiares, como cobrar el dinero que se le debía a Kepler.**



Esta premonición no es muy significativa, pues Kepler era muy hipocondríaco y creyó prever su final en varias etapas de su vida. Pero esta vez, efectivamente, tuvo una repentina y extraña enfermedad que en muy pocos días lo llevó a la muerte. Murió en Ratisbona el 15 de noviembre de 1630. Como había hecho en toda su vida, no dio su brazo a torcer, manteniendo sus creencias religiosas a pesar de los esfuerzos de sus confesores católicos para recibir su confesión en el lecho de muerte. Dijeron estos que en silencioso extravío mental «señalaba con su índice ora hacia su frente ora hacia el cielo sobre él». Evidentemente, hoy vemos que ese gesto no era en modo alguno signo de extravío, sino de perfecta lucidez: de cara a la muerte, daba a entender que su vida había sido un vuelo de su mente al firmamento, de su cabeza hacia lo alto, donde estaba el mundo o donde estaba Dios, pues mundo y Dios eran para él entes inseparables.

Para terminar una vida novelesca con un fin novelesco, sus amigos los astros vinieron al sepelio del astrónomo. En efecto, el día de su muerte hubo una caída de «bolas de fuego», una lluvia de meteoritos especialmente deslumbrante. Y al día siguiente hubo un eclipse de Luna. Algunos tomarían estas señales como un manifiesto de los cielos en honor de quien tanto los estudió en vida. En todo caso, fue una caída de telón apropiada y merecida para el drama de la vida de un admirable astrónomo.

Fue, entonces, al parecer, perdonado por los luteranos y enterrado en su cementerio, como él siempre había querido, en las afueras de Ratisbona. Sin embargo, las guerras y la peste asolaron este cementerio y hoy los restos de Kepler están en paradero desconocido. Su epitafio fue el que él mismo había dispuesto:

> «Mensus eram coelos, nunc terrea metior umbras.
> Mens coelestis erat, corporis umbra yacet.»
>
> («Medía los cielos, ahora el interior de la tierra.
> Del cielo era la mente, en la tierra yace el cuerpo»).

Lecturas recomendadas

ANGUITA, F., CASTILLA, G., *Crónicas del Sistema Solar*, Madrid, Equipo Sirius, 2010.

BATTANER, E., *El astrónomo y el templario*, Barcelona, Nabla Ediciones, 2010.

—: *¿Qué es el Universo? ¿Qué es el hombre?*, Madrid, Alianza Editorial, 2010.

—: *Planetas*, Madrid, Alianza Editorial, 1991.

CARRASCO, E., CARRAMIÑANA, A., *Del Sol a los confines del Sistema Solar*, Fondo de Cultura Económica, 2005.

CASPAR, M., *Kepler*, Madrid, Acento, 2003.

FERRIS, T., *La aventura del universo*, Barcelona, Crítica, 2007.

GALILEI, G. y KEPLER, J., *La gaceta sideral* y *Conversaciones con el mensajero sideral*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.

GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

KEPLER, J., *Sobre la estrella nueva*, Málaga, Encasa, 2008.

—: *El sueño o la astronomía de la Luna*, Universidades de Huelva y Sevilla, 2001.

KOESTLER, A., *Kepler*, Barcelona, Salvat Editores, 1987.

KRAGH, H., *Historia de la cosmología*, Barcelona, Crítica, 2008.

LARA, L., *Introducción a la física del Cosmos*, Editorial Universidad de Granada, 2007.

MARTÍNEZ, V.J., MIRALLES, J.A., ET AL., *Astronomía fundamental*, Valencia, Publicaciones Universidad de Valencia, 2005
TAYLOR, S.R., *Nuestro Sistema Solar. Su lugar en el Cosmos*, Cambridge University Press, 2000.

Índice